

**SVEUČILIŠTE JOSIP JURAJ STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Diplomski studij**

**MJERENJE I ANALIZA KVALITETE ELEKTRIČNE  
ENERGIJE U PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI**

**Diplomski rad**

**Hrvoje Albert**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1.UVOD .....   | 1  |
| Opis zadatka .....                                   | 1  |
| 2.KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....                | 2  |
| 2.1.Pokazatelji kvalitete električne energije .....  | 2  |
| 2.2. Harmonici u kvaliteti električne energije ..... | 7  |
| 3.HARMONICI U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU .....          | 15 |
| 3.1. Toplinski efekti na transformatorima.....       | 15 |
| 3.2. Mjerenje harmonika .....                        | 21 |
| 3.3.Tehnike filtriranja harmonijskog sadržaja .....  | 23 |
| 4.ANALIZA MJERNIH REZULTATA .....                    | 29 |
| 5.ZAKLJUČAK.....                                     | 34 |
| 6.LITERATURA.....                                    | 35 |
| 7.ŽIVOTOPIS.....                                     | 36 |
| 8.SAŽETAK.....                                       | 37 |
| 9.ABSTRACT .....                                     | 37 |

## **1.UVOD**

Zanimanje za kvalitetu električne energije počelo je zapravo još od samog početka uporabe električne energije. Tada se najveća pažnja pridavala iznosu opskrbnog napona, odnosno opsegu u kojem trošila mogu ispravno raditi. U osamdesetim godinama 20. stoljeća dolazi do naglog porasta primjene elektroničkih uređaja: u kućanstvima, u uslužnoj djelatnosti te u industrijskim pogonima.

Elektronički nelinearni uređaji mogu izazvati brojne probleme vezane za kvalitetu opskrbnog napona, a u isto vrijeme su vrlo osjetljivi na “lošu” kvalitetu napona. Zbog toga 1989. godine počinju pripreme za izradu standarda koji će dati smjernice i ograničenja vezane za glavne pokazatelje kvalitete napona: frekvencije, amplitude, valnog oblika i simetrije trofaznog napona, a u studenom 1994. godine izlazi standard EN 50160. Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža [1,2].

Posebnu pozornost potrebno je posvetiti kvaliteti električne energije u industrijskim postrojenjima jer povećani problemi često izazivaju probleme u proizvodnji, a u najgorem slučaju i prekide proizvodnih procesa[3]. Stoga se u ovom radu prikazuju rezultati mjerenja kvalitete električne energije u industrijskom pogonu za proizvodnju slatkiša, analiza (eventualnih) problema te preporuke za poboljšanja kvalitete električne energije.

### **1.1Opis zadatka**

Obraditi pokazatelje kvalitete električne energije s posebnim naglaskom na više harmonike. Analizirati mjerenja kvalitete električne energije koja su analizatorom A-eberle PQ box 200 izvedena u trajanju dva tjedna u pogonu za obradu kakaovca u tvornici Kandit d.o.o. Mjerne rezultate usporediti sa zahtjevima norme HRN EN 50160.

## **2.KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Električna energija danas je nezamjenjivi izvor energije za svu industriju. Izvori napajanja električnom energijom idealno bi imali oblik sinusoidalne matematičke funkcije u svakoj točki energetskeg sustava, ali to nije ostvarivo zbog sve većeg udjela nelinearnih trošila u industrijama kao što su: prehrambene industrije, željezare, rudnici, metalske industrije, itd..., Većina problema nastaje zbog velikih rotirajućih strojeva i energetskih pretvarača koji unose više harmonike u mrežu. Razlike vremenskih oblika napona i struje od sinusnog oblika opisano je harmonijskim izobličenjem.

Harmonijsko izobličenje nije nova pojava u energetskeg mreži, ali ona predstavlja veliku brigu inženjerima koji pronalaze brojna rješenja za njeno smanjenje. Promjenjiva rotacijska brzina električnih strojeva je veliki problem za upravljanje pa su zbog toga inženjeri godinama razvijali sustave koji će im pomoći pri boljoj regulaciji. Najpoznatiji uređaji za regulaciju brzine rotirajućih strojeva su: soft-start, sklopka zvijezda-trokut, a trenutno najkorišteniji uređaj je frekvencijski pretvarač koji regulira brzinu pomoću frekvencije [4,5].

### **2.1.Pokazatelji kvalitete električne energije**

Dva osnovna dijela kvalitete električne energije su neprekinutost napajanja i razina napona. Kvaliteta električne energije opisuje se pomoću pokazatelja kao što su npr. amplituda, frekvencija, valovitost (harmonici), simetrija napona itd.. Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona: naponski propadi i prekidi, naponska kolebanja, harmonici i međuharmonici, prijelazni prenaponi, valovitost, naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije mreže, prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom te prisutnost signalnih napona Napon električne mreže konstantno se mijenja zbog velikog broja uklapanja i isklapanja električnih uređaja spojenih na električnu mrežu te nastaju kolebanja napona. Kolebanje napona je serija naponskih promjena, tj. periodična promjena envelope napona[5].

Treperenje je posljedica brzih uzastopnih naponskih promjena a manifestira se vidnim prekidanjem rasvjete. Treperenje napona iskazuje se putem kratkotrajnih flikera čije trajanje je 10 min. i dugotrajnih koji se računaju pomoću dvanaest uzastopnih vrijednosti kratkotrajnih treperenja. Glavni izvori brzih kolebanja napona su industrijska opterećenja, npr.: valjaonice, veliki industrijski motori s promjenjivim opterećenjima, lučne peći, uređaji za lučno

zavarivanje, pilane, uklapanje kondenzatora za korekciju faktora snage, električni grijači vode velikih kapaciteta ili opterećenja velikih kapaciteta koja su spojena na elektrodistribucijsku mrežu (samostalni obrtnici), uređaji s x-zračenjem, laseri, fotokopirni uređaji velikih kapaciteta, klimatizacijska oprema za hladne komore u mesnicama, itd..[5].

Naponski propadi su elektromagnetski poremećaji sa dvije dimenzije: razinom napona i vremenom trajanja. Razina napona je efektivna vrijednost napona, a trajanje naponskog propada je vrijeme između trenutka u kojem efektivna vrijednost napona pada ispod granične vrijednosti i trenutka u kojem ponovno dostiže graničnu vrijednost, a za nju se uzima donja vrijednost tolerancije za naponska kolebanja. Naponski prekid definira se kao stanje pri kojemu je opskrbeni napon na mjestu isporuke manji od 1% nazivnog (dogovorenog) napona. Oni mogu biti kratkotrajni (kraći od 3 minute), dugotrajni (dulji od 3 minute), te planirani i neplanirani. Uzroci naponskih propada i kratkotrajnih prekida su kratki spojevi u prijenosnim i distribucijskim mrežama. Kratki spoj uzrokuje veliki porast struje, koja tada uzrokuje velike naponske propade na impedancijama sustava [4].

Parametri kvalitete električne energije po normi EN 50160:

1. Naponski propadi i prekidi,
2. Naponska kolebanja,
3. Harmonici i međuharmonici,
4. Prijelazni prenaponi,
5. Valovitost,
6. Naponska nesimetrija,
7. Promjene osnovne frekvencije mreže,
8. Prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom,
9. Prisutnost signalnih napona[4].

Pod kolebanjem napona podrazumijevamo sve polagane promjene napona, koje su generalno prihvatljive ako se pri normalnim pogonskim uvjetima 95% svih 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona opskrbe svakog tjednog intervala nalazi unutar +/- 10% vrijednosti normiranog nazivnog napona [6].

Treperenje ili flicker je parametar kvalitete električne energije koji definira promjenu intenziteta svjetla u radnoj ili životnoj sredini i negativno djeluje na zdravlje ljudi te na

njihovu radnu i svaku drugu sposobnost. Definicija flikera je: ako u jednoj prostoriji boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima i ako se intenzitet toliko promjeni da to primijeti 50 od ukupnog broja nazočnih osoba, tada flicker ima intenzitet 1, a računamo ga po formuli (2-1)[6].

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{Psti^3}{12}} \quad (2-1)$$

Električni uređaji napajani sa NN mreža kao što su dizala, pumpe, ventilatori, električni kotlovi, hladnjače, električni štednjaci ili uređaji za klimatizaciju, koji imaju veliku snagu i koji se ciklički ili nepravilno uključuju i isključuju, potencijalni su izvori treperenja. Pad napona može se izračunati uzimajući u obzir odnos između struje koju apsorbira opterećenje u procesu pokretanja i nazivne struje. Ostali potencijalni generatori treperenja u NN sustavima su rendgenska oprema i veliki strojevi za kopiranje[6].

## 2.2. Linearni i nelinearni tereti

Na opremu potrošača i distribucijsku mrežu velikim dijelom utječe harmonijski poremećaj valnog oblika napona, zbog korištenja sve većeg broja nelinearnih trošila. Linearni tereti su trošila kod kojih valni oblici napona i struja prate jedan drugog, pa tako pad napona na trošilu uzrokuje linearno smanjenje iznosa struje kroz isto trošilo, što je objašnjeno poznatim zakonom pod nazivom Ohmov zakon (2-1) [5].

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \quad [A] \quad (2-1)$$

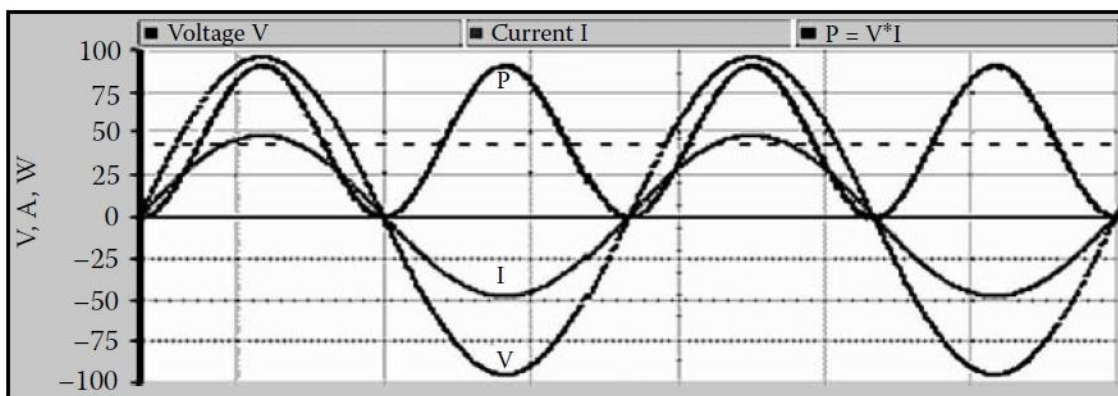
Zbog ovog zakona valni oblici napona i struja u električnim krugovima sa linearnim trošilima izgledaju jednako i nemaju izobličenje. Otpornička linearna trošila (Slika 2.1.[5]) kao što su grijači i žarulje sa žarnom niti, potrošnju električne energije manifestiraju zagrijavanjem medija oko sebe pojavom Jouleovih gubitaka, proporcionalnih kvadratu struje vidljivo iz relacije (2-2),[5].

$$p(t) = i(t)^2 * R [W] \quad (2-2)$$

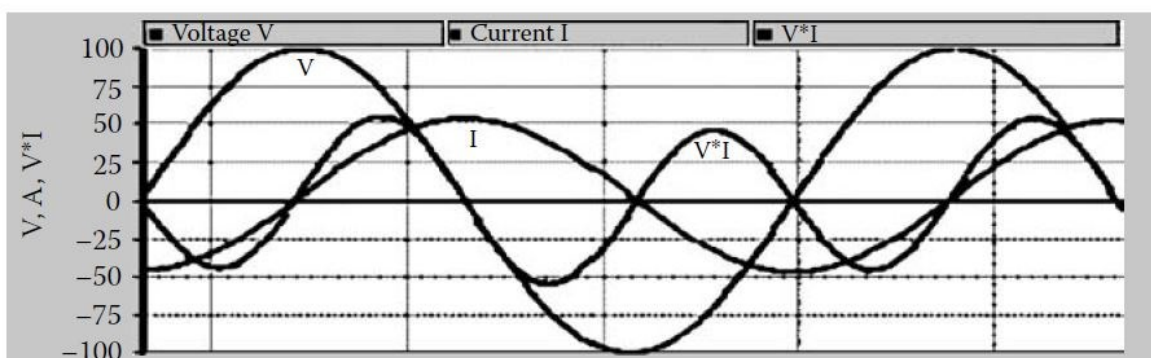
Induktivna linearna trošila (Slika 2.2.[5]) kao što su: električni motori, pumpe za vodu, naftne pumpe, dizalice,...itd., pridodati će gubitke magnetske jezgre ili gubitke u željezu, koji ovise o fizikalnim karakteristikama željeza.

Kapacitivna trošila (Slika 2.3.[5]), treća vrsta linearnih trošila kao što su akumulatorske baterije i kondenzatori koji se u energetsom sustavu koriste za korekciju faktora snage (2-3),[5].

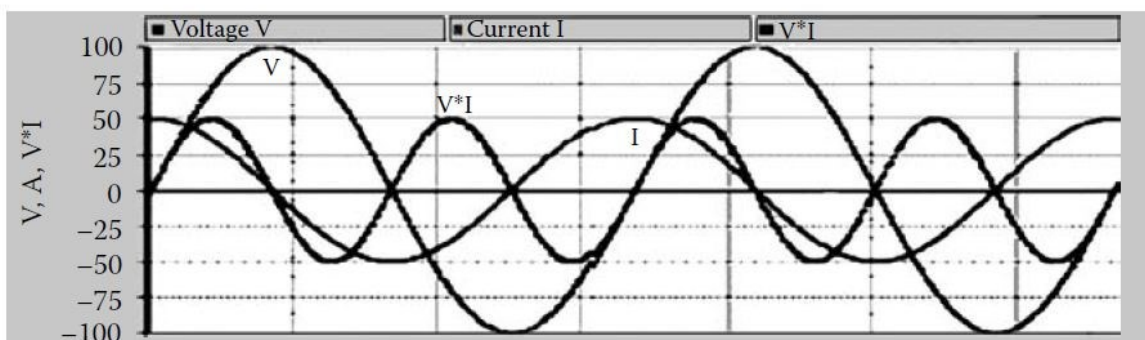
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (2-3)$$



Slika 2.1. Valni oblici napona, struje i snage linearnog tereta radnog karaktera;[5]



Slika 2.2. Valni oblici napona, struje i snage linearnog tereta induktivnog karaktera;[5]



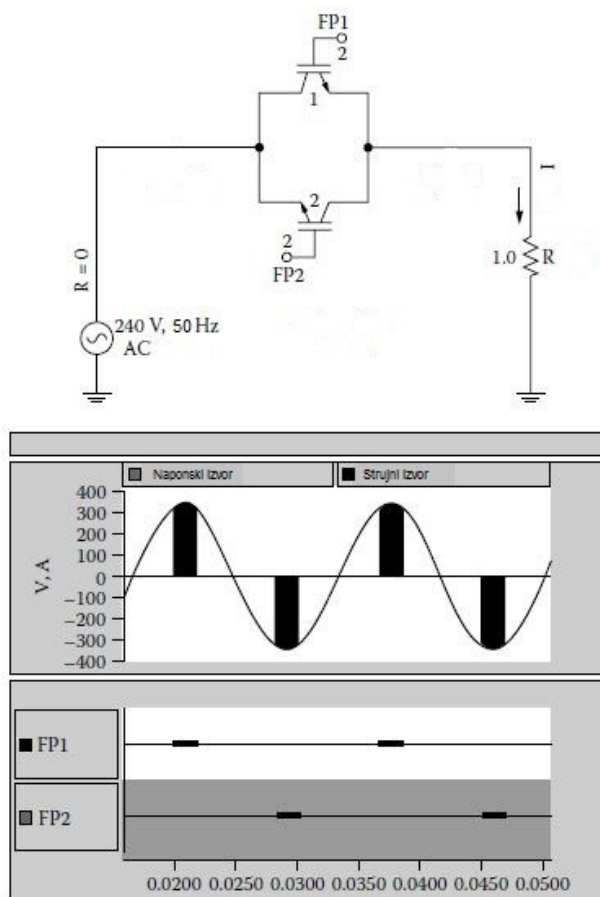
Slika 2.3. Valni oblici napona, struje i snage linearnog tereta kapacitivnog karaktera; [5]

Nelinearna opterećenja su opterećenja u kojima valni oblik struje ne nalikuje na promijenjeni valni oblik napona zbog brojnih razloga, na primjer zbog uporabe elektroničke sklopke koje provode struju opterećenja samo tijekom kraćeg dijela vremenskog razdoblja. Dakle, nelinearna opterećenja možemo zamisliti kao ona u kojima Ohmov zakon ne možemo opisati odnosom  $U \cdot I$  [5].

Među najčešćim nelinearnim opterećenjima u elektroenergetskim sustavima su sve vrste ispravljačkih uređaja kao što su oni koji se nalaze u pretvaračima energije, izvorima napajanja,

jedinicama za neprekinuto napajanje (UPS) i lučnim uređajima kao što su električne peći i fluorescentne svjetiljke[5].

Nelinearna opterećenja uzrokuju niz poremećaja poput izobličenja valnog oblika napona, pregrijavanja u transformatorima i drugim uređajima za napajanje, prekomjerno strujanje na priključcima za opremu, telefonske smetnje i probleme s kontroliranjem mikroprocesora. Slika 2.4[5] prikazuje naponske i strujne valne oblike tijekom komutacijskog djelovanja bipolarnog tranzistora izolirane priključne grane (IGBT). Ovo je najjednostavniji način ilustracije izvedbe nelinearnog opterećenje u kojem struja ne slijedi sinusoidalni valni oblik napona, osim u vrijeme kada se aktiviraju impulsi FP1 i FT2. Neki regulatori motora, oprema za kućanstvo poput TV prijemnika i multimedije te velika raznolikost druge kućanske i komercijalne elektroničke opreme koriste ovu vrstu naponske kontrole. Kada se isti proces odvija u tri faze količina opterećenja je značajna, može doći do određenog izobličenja naponskog signala[5].

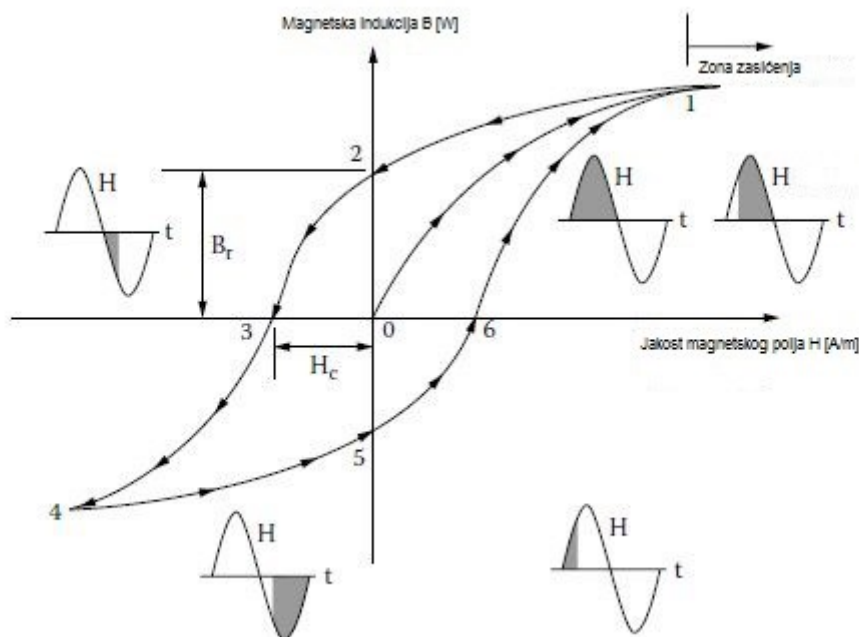


Slika 2.4. Naponski i strujni valni oblici tijekom komutacijskog djelovanja IGBT-a;[5]

Čak i linearna opterećenja poput energetskih transformatora mogu djelovati nelinearno pod zasićenjem, a to znači da se u određenim slučajevima gustoća magnetskog toka (B) u transformatoru prestaje povećavati ili se povećava vrlo malo kako raste intenzitet magnetskog polja (H). To se događa iza tzv. koljena zasićenja magnetiziranja krivulje transformatora. Ponašanje transformatora pod



promjenom ciklusa pozitivnih i negativnih vrijednosti magnetskog polja H prikazana je na slici 2.5 [5] i poznata je kao krivulja petlje histereze [5].



Slika 2.5. Krivulja petlje histereze;[5]

Naravno, ovaj nelinearni učinak trajat će sve dok se stanje zasićenja ne prevlada. Na primjer, povišeni napon može se unijeti u transformator za vrijeme niskotarifnih uvjeta koji mogu trajati i do nekoliko sati, ali stanje preopterećenosti transformatora se često opaža kod pokretanja velikih motora ili velikih inercijskih opterećenja u industrijskom okruženju u trajanju od nekoliko sekundi[5].

### 2.3. Harmonici u kvaliteti električne energije

Harmonici su sinusni naponi ili struje s frekvencijama koje su višekratnici nazivne frekvencije od 50 Hz. Kod čistog sinusnog oblika napona s frekvencijom od 50 Hz i amplitudom od 230 V, spektar je jednak nuli za sve frekvencije osim za 50 Hz, za koju je vrijednost 230 V. Kod poremećenog (iskrivljenog, izobličenog) oblika napona, spektar sadrži harmonijske frekvencije koje su karakteristične za određenu prirodu poremećaja. Izobličenje signala računa se faktorom ukupnog harmonijskog izobličenja – THD (engl. *Total Harmonic Distortion*), , vidljivo iz relacija (2-4,2-5)[4].

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \frac{100\%}{U_1} \quad (2-4)$$

$$THDI = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h)^2} \frac{100\%}{I_1} \quad (2-5)$$

THD je zbroj efektivnih vrijednosti napona svih harmonijskih frekvencija, a prikazuje se relativno u odnosu na osnovni naponski harmonik. Kako bi se smetnje uzrokovane harmonicima smanjile na propisane razine, na sabirnicama gdje je spojeno osjetljivo

opterećenje mogu se poduzeti sljedeće mjere. Odvajanje ometajućih i osjetljivih opterećenja zasebnim sabirnicama, povećavanje broja okidanja pretvarača, itd.. Ako je u pitanju nekoliko izvora, moguće ih je spojiti preko transformatora s različitim faznim pomacima tako da vektori struja viših harmonika kod zbrajanja imaju povoljne smjerove, ugradnja filtera na sabirnice sa izvorom harmonika[4].

K faktor (2-6 [5]) je koristan indeks koji bi trebao slijediti zahtjeve od National Electrical Code (NEC) i Underwriter's Laboratories (UL) u pogledu mogućnosti distribucije i posebnih transformatora u industriji da rade unutar određenih toplinskih granica u harmonijskim okruženjima. To su transformatori dizajnirani za rad pri nižim gustoćama magnetske indukcije od konvencionalnih izvedbi da bi se omogućila dodatna magnetska indukcija koja nastaje harmonijskim strujama[5].

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \sum_{h=1}^{\infty} [I_h(p.u.)]^2 * (h^2) \quad (2-6)$$

S porastom harmonijskog izobličenja, konvencionalna definicija faktora snage koja se opisuje kao kosinus kuta između fundamentalne frekvencije napona i struja, je napredovala pa uzima u obzir signale efektivne vrijednosti, koje čine doprinos komponenata različitih frekvencija. Dakle, faktor snage pomaka (DPF) i dalje karakterizira faktor frekvencije snage, dok se izobličenje ili pravi faktor snage (TPF) pojavljuje kao indeks koji prati varijacije signala rms. Ukupan faktor snage (PF<sub>total</sub>) tako postaje rezultat izobličenja faktora snage (2-7[5]) [5].

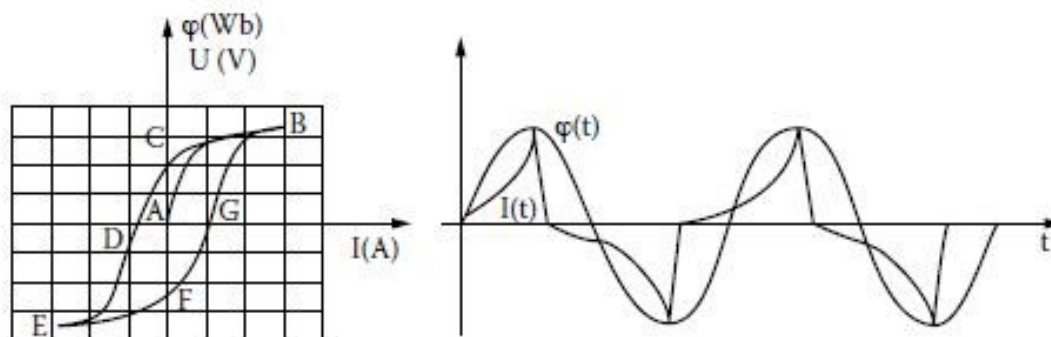
$$PF_{total} = DPF * TPF = \cos(\theta_h - \delta_h) = \left(\frac{P_1}{U_1 I_1}\right) \left(\frac{\sum_{h=1}^{\infty} U_1 I_1 \cos(\theta_h - \delta_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (U_h)^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2}}\right) = \left(\frac{P_1}{U_1 I_1}\right) \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{THDI}{1}\right)^2}} \quad (2-7)$$

gdje su P<sub>1</sub>, U<sub>1</sub> i I<sub>1</sub> temeljne frekvencijske veličine , aU<sub>h</sub>, I<sub>h</sub>, θ<sub>h</sub> i δ<sub>h</sub> odnose se na frekvenciju h pomnoženu frekvencijom snage sustava[5].

Prije razvoja energetske elektroničke sklopne uređaja, propagacija harmonijskih struja je promatrana iz perspektive dizajna i snage uređaja s magnetskim jezgrama , poput električnih strojeva i transformatora. U novije vrijeme harmonijsko izobličenje proizvedeno u zasićenosti transformatora na vrhuncu potražnje ili pod povišenim naponom za vrlo niska opterećenja jedna je od brojnih situacija koje stvaraju harmonijsko izobličenje valnog oblika.

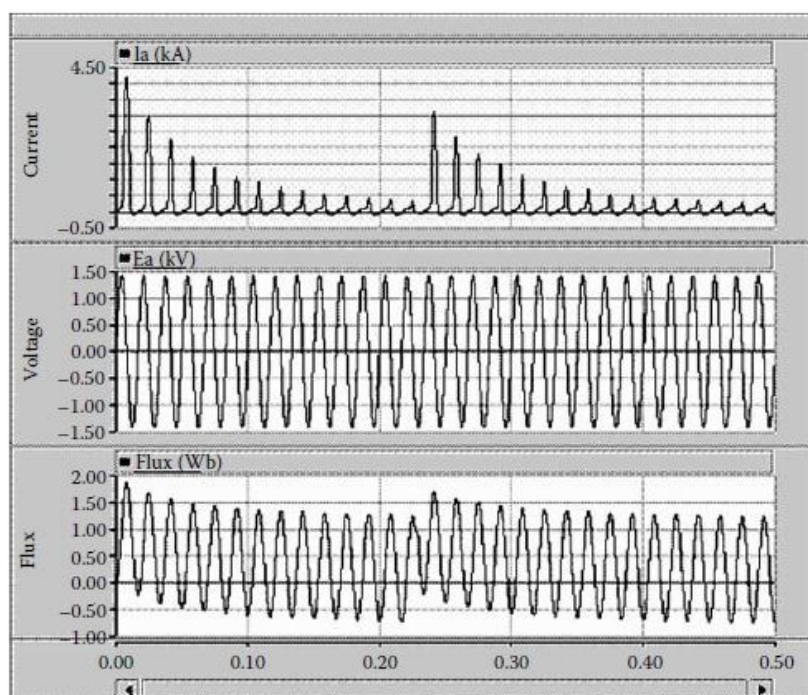
Izvori izobličenja valnih oblika u elektroenergetskim sustavima su višestruki, a jedan je u uslužnim poduzećima, gdje se mogu naći manji tereti (manje od 1 kVA) do velikih tereta (veći od desetak MVA). Komercijalni i stambeni objekti također mogu postati značajni izvori harmonika. To je osobito istinito kada se uzmu u obzir kombinirani efekti svih pojedinačnih opterećenja posluženih istim opskrbljivačem. Primjerice, jednostavan izvor napajanja kućnog stolnog računala može privući oko 4 A s 127 V, odnosno oko 500 VA. Srednji napon napojnog uređaja koji obično poslužuje oko 2500 klijenata, na kraju će opskrbljivati oko 1,25 MVA snage računala pod vjerojatnim scenarijem kada svi korisnici budu provjeravali račune e-pošte ili pregledavali internet na jednome području u vrijeme najvećeg opterećenja[5].

Harmonijsko izobličenje kod transformatora može nastati u uvjetima zasićenja jezgre u slijedeća dva slučaja: a) pri radu iznad nazivne snage; b) pri radu iznad nazivnog napona. Prva situacija može se pojaviti tijekom vršnih razdoblja opterećenja, a drugi slučaj pojavljuje se u uvjetima niskog opterećenja, naročito ako su kondenzatorske baterije ostale uključene, a napon raste iznad nominalnih vrijednosti. Transformator koji djeluje na području zasićenja će pokazati nelinearnu struju magnetiziranja, koja sadrži niz neparnih harmonika, s trećim dominantnim. Učinak će postati očitiji s povećanjem opterećenja. U idealnoj jezgri bez gubitaka, nema gubitaka histereze. Magnetski tok i struja potrebni za njihovu proizvodnju povezani su strujom magnetiziranja čeličnog lima koji se koristi u konstrukciji jezgre. Čak i pod ovim uvjetom, ako uzmemo u obzir struju magnetiziranja prema vremenu za svaku vrijednost magnetskog toka, resultantni strujni valni oblik bio bi daleko od sinusoidnih. Kada se uzme u obzir učinak histereze, ta nesinusna struja magnetiziranja nije simetrična s obzirom na njegovu maksimalnu vrijednost. Iskrivljenost je obično zbog višekratnika trećeg harmonika, što je vidljivo iz grafa na slici 2.6[5].



Slika 2.6. Graf odnosa magnetskog toka i struje magnetiziranja u vremenu  $t$ ;[5]

Problemi sa harmonijskim izobličenjem kod električnih motora slični su kao kod transformatora, ali se razlikuju zbog drugačije konstrukcije stroja. Kao rezultat malih nesimetrija na utorima stroja, utorima rotora ili neznatnih nepravilnosti u namotajima trofaznog rotirajućeg stroja, mogu se razviti harmonijske struje. Ovi harmonici induciraju elektromotornu silu na namotajima statora na frekvenciji jednakoj omjeru brzine i valne duljine. Rezultirajuća raspodjela magnetskih sila u stroju proizvodi harmonike koji su funkcija brzine. Na slici 2.7[5] vidljivi su odnosi struje, napona, magnetskog toka o vremenu. Dodatne harmonijske struje mogu se stvoriti nakon zasićenja magnetske jezgre. Međutim, ove harmonijske struje obično su manje od onih koje su razvijene kada se strojevi napajaju kroz varijabilne frekvencijske pogone (VFD) [5].



Slika 2.7. Valni oblici struje, napona i magnetskog toka na rotirajućim strojevima;[5]

Treća vrsta uređaja koji unose harmonike u energetska mrežu su energetska pretvarači koji zbog komponenata od kojih su konstruirani prave probleme u mreži. Sve veća upotreba regulatora u kojima se parametri poput napona i frekvencije mijenjaju kako bi se prilagodili specifičnim industrijskim i komercijalnim procesima, učinilo je energetska pretvarače najraširenijim izvorom harmonika u distribucijskim sustavima. Pretvarači se mogu grupirati u sljedeće kategorije:

- a) Veliki pretvarači energije

Poput onih koji se koriste u metalskoj industriji i u istosmjernim VN prijenosnim sustavima. Oni se koriste u električnim aplikacijama u kojima se veliki blokovi energije pretvaraju iz AC u DC. Njihova nominalna snaga je u rasponu MVA, te predstavljaju mnogo veću induktivnost na DC nego na AC strani. Stoga je istosmjerna struja praktički konstantna i pretvarač djeluje kao harmonijski izvor napona na strani istosmjerne struje i kao harmonijski izvor struje na AC strani. Nadalje, u savršeno uravnoteženom sustavu, sve rezultirajuće struje su iste u svim fazama[5].

#### b) Srednji po veličini pretvarači energije

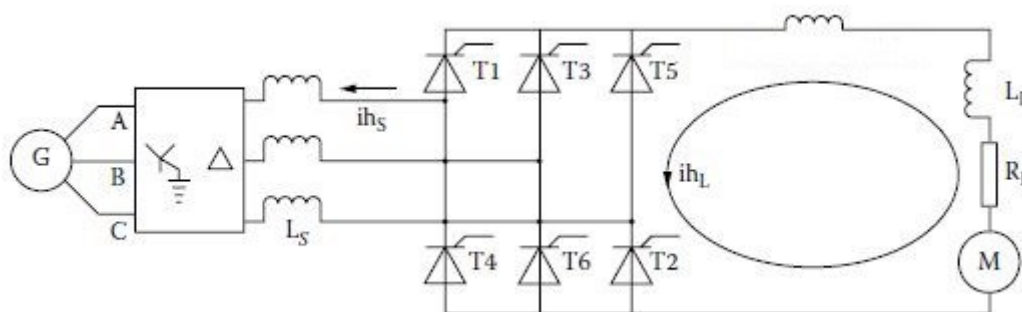
Poput onih koji se koriste u proizvodnoj industriji za kontrolu brzine motora i u željezničkoj industriji. Pretvarači u rasponu kVA nalaze se u sve većem broju u industriji. Prve primjene u industriji bile su za upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog motora koja još uvijek predstavlja glavno tržište za ove vrste pretvarača. Međutim, oni se sve više koriste u regulaciji brzine asinkronog motora. Pretvarači srednjih snaga danas se primjenjuju u naftnoj industriji, gdje se potopni sustavi crpki koriste u pogonima s promjenjivom frekvencijom kao jedna od metoda za proizvodnju nafte. Nadalje, pojava energetske tranzistore i GTO-tiristore progresivno stimulira uporabu energetske pretvarača za regulaciju brzine izmjeničnih motora. Kod velikih energetske pretvarača, peti harmonik može doseći amplitude koje se kreću od jedne petine do jedne trećine nazivne struje. U slučaju primjene u električnim željeznicama uobičajeno je vidjeti pojedinačnu kontrolu na svakom ispravljačkom mostu. Tijekom ubrzanja istosmjernog motora s maksimalnom strujom, ispravljački most proizvodi najviše harmonike struje i radi s malim faktorom snage. Da bi se to stanje smanjilo pri malim brzinama, jedan od mostova se zaobilazi dok se kontrola faze primjenjuje na drugi most[6].

#### c) Mali ispravljači energije

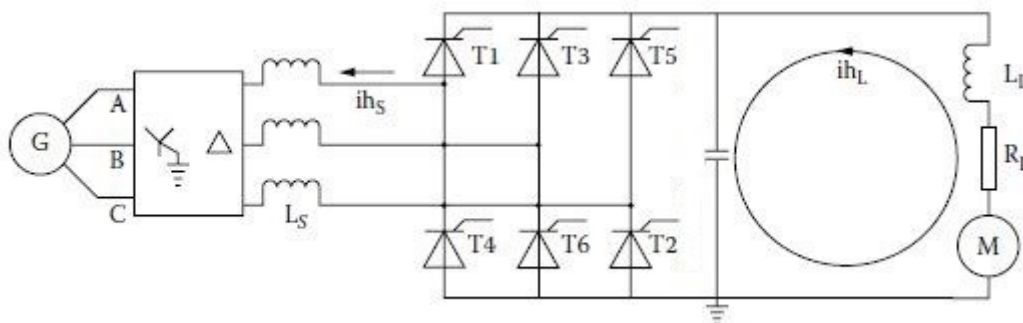
Mali ispravljači energije su oni koji se koriste u kućanskim uređajima, uključujući TV aparate i osobna računala, kao i punjači baterija koji su još jedan primjer malih pretvarača snage. Neprekidni izvori napajanja (UPS-ovi), zavarivači i pisari nalaze se među tim pretvaračima malih snaga. Brojni uredi danas su nezamislivi bez velikog broja računala i njihovih perifernih uređaja. Ako su takvi uredi dodatno opremljeni UPS-om za upravljanje naponom i prekidima napajanja, količine harmonika struja mogu se bitno povećati. Stambena naselja u određeno doba dana djeluju kao harmonijski izvori koje proizvode sve vrste kućanskih uređaja[5].

Ukupni harmonijski sadržaj varira kao funkcija vremena i uključuje slučajnu vjerojatnost. Kao i kod drugih uređaja koji koriste istosmjernu struju (TV prijemnici, radio i stereo pojačala, itd.) punjači proizvode harmonike 3. reda, koji preopterećuju neutralni vodič

trofaznog distribucijskog transformatora koji napaja jednofazna NN opterećenja. To je zato što se fazni kutovi trećeg harmonika ne razlikuju dovoljno da bi se harmonici poništili, nego se oni algebarski zbrajaju. Fluorescentna rasvjeta također proizvodi harmonike višekratnika trećeg reda, za koje istodobno korištenje punjača baterija i fluorescentnih svjetiljki iz istog kruga može pogoršati kvalitetu električne energije. Za razliku od ranije opisanih vrsta opterećenja, opterećenja na koja se pozivamo u ovom odlomku su važna samo ako predstavljaju značajan dio ukupnog opterećenja pod istodobnim operacijama. Sheme spoja naponskog energetskog pretvarača(Slika 2.8.[5]) i strujnog energetskog pretvarača( Slika 2.9.[5]).



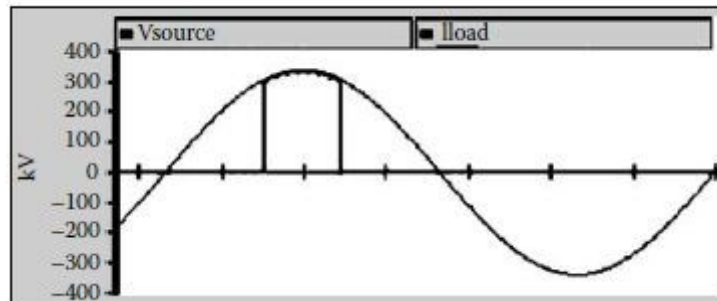
Slika 2.8. Strujni energetski pretvarač;[5]



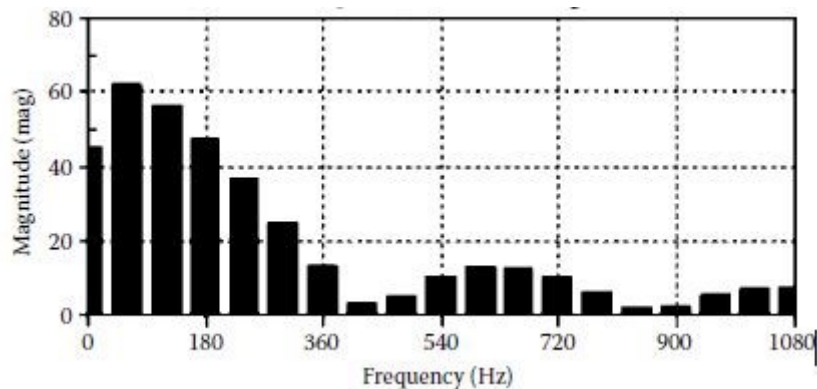
Slika 2.9. Naponski energetski pretvarač[5]

Na slici 2.10[5] opisan je osnovni odnos struje i napona u kojem poluvalno upravljanje koristi GTO tiristor za izvlačenje struje tijekom dijela pozitivnog polu-ciklusa valnog oblika izmjenične struje. Primijetite kako, u ovom slučaju, valni oblik ne sadrži harmonike zbog simetrije prekidačkog djelovanja u odnosu na x-os. Dakle, pojavljuju se samo neparni i nulti harmonijski nizovi. Isti rezultat se može postići Fourier-ovom analizom razgradnje bilo kojeg valnog oblika koji sadrži identične značajke na dva polu-ciklusa.

Snažna komponenta istosmjerne struje zbog djelovanja prekidača koja se odvija samo na jednoj strani AC ciklusa očituje se na slici 2.11[5], te su vidljivi i nulti harmonici. Ovo neobično ponašanje također je karakteristično za neuravnotežene trofazne sustave[5].



Slika 2.10. Harmonijski spektar struje koristeći GTO;[5]



Slika 2.11. Frekvencija pri radu GTO tiristora;[5]

12-pulsni pretvarači napajaju se iz transformatora s tri namota, s faznom razlikom od  $30^\circ$  između sekundarnog i tercijarnog namota, a svaki je povezan s mostom pretvarača. Ovi pretvarači stvaraju harmonike reda  $12k (\pm 1)$  na strani izvora. Harmonijske struje reda  $k (\pm 1)$ , gdje je  $k = 5, 7, 17, 19$ , itd. prolaze između sekundarnog i tercijarnog namota transformatora, ali ne ulaze u AC mrežu. Na amplitudu harmonijske struje na prednjem kraju pretvarača utjecat će prisutnost zavojnice za izravnivanje valnog oblika, kao što je prikazano na slikama 2.8., 2.9. Za šest-impulsni diodni most koji ima veliku zavojnicu za izravnivanje valnog oblika, veličina harmonika može se aproksimirati izrazom (2-8):

$$|I_h| = \frac{|I_{found}|}{h} \quad (2-8)$$

gdje su:  $I_h$  i  $I_{found}$  amplitude harmonika  $n$ -tog reda

Fluorescentne cijevi su vrlo nelinearne u svom radu, te uzrokuju povećanje harmonika struje velikih iznosa. Kao kratak prikaz rada fluorescentne svjetiljke, možemo reći da

zavojnice imaju funkciju balasta, pa ograničavaju struju kroz fluorescentnu cijev. Isto tako, pomoću kondenzatora povećavaju učinkovitost balasta povećavajući svoj faktor snage. Elektronika radi na većoj frekvenciji, što omogućuje upotrebu manjih zavojnica i kondenzatora. Korištenje viših frekvencija omogućuje im stvaranje više svjetla za isti ulazni napon, pa se to koristi u svrhu povećanja učinkovitosti. Izazov za dizajnere električnih sustava u uslužnim poduzećima i industriji je dizajniranje novih sustava i / ili prilagodba postojećih sustava za rad u okruženjima s povećanim harmonijskim razinama. Izvori harmonika u električnom sustavu budućnosti biti će raznoliki i brojniji. Problem postaje kompliciran s povećanom upotrebom osjetljive elektronike u industrijskim automatiziranim procesima, osobnim računalima, digitalnim komunikacijama i multimediji[5].

Uslužna poduzeća, koja se smatraju velikim generatorima harmonika, mogu se povezati kako bi se pridružile trenutnim proizvođačima harmonika s integracijom distribuiranih izvora u porastu. Očekuje se da će fotonaponske elektrane, vjetroelektrane, elektrane na prirodni plin igrati sve važniju ulogu u upravljanju potrebama za električnom energijom u budućnosti. Distribuirane generatore koji trenutačno preuzimaju dio tereta postrojenjima, posebice tijekom vršne potrošnje nazivamo mikroturbinama[5].



### **3.HARMONICI U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU**

Na prijelazu u 21. stoljeće u cijelom svijetu je vidljivo povećanje potrošnje električne energije, ponajviše u kućanstvima koja sve više koriste elektroničke uređaje poput: televizora, perilica posuđa, perilica rublja, sušilica rublja, računala, konzola, pisača, mobitela, telefona, rasvjete, itd..., a to je jasan pokazatelj da se kućanstva sve brže približavaju industriji kao generatori strujnih harmonika koji se unose u distribucijski sustav i dovode do brojnih problema u ravnoteži sustava. Kao rezultat toga, znatan broj korisnika električne energije ostaje izložen učincima harmonijskog izobličenja na industrijska i stambena opterećenja [5].

#### **3.1. Toplinski efekti na transformatorima**

Na visokonaponske i niskonaponske mreže sve više utječu značajne količine harmonijskih struja koje stvaraju različita nelinearna opterećenja, kao što su pogoni promjenjive brzine, električne i indukcijske peći, fluorescentna rasvjeta, kao i neprekidna napajanja i veliki broj kućnih uređaja za zabavu, uključujući i osobna računala. Sve te struje dobivaju se putem servisnih transformatora. Poseban aspekt transformatora je da u uvjetima zasićenja postaju izvor harmonika. Transformatori spojeni na spoj trokut-zvijezda ili trokut-trokut povezuju nulte struje koje pregrijavaju neutralne vodiče. Kružne struje u spoju trokut povećavaju efektivnu vrijednost struje i proizvode dodatnu toplinu. Ovo je važan aspekt za promatranje struje na visokonaponskoj strani transformatora s trokut spojem koja se neće odražavati na struje nulte jednadžbe, ali njihov učinak na stvaranje toplinskih gubitaka postoji[5].

Općenito, gubici harmonika nastaju zbog povećane disipacije topline u namotajima i scin efekta, jer su oba funkcija kvadrata efektivne struje, kao i od vrtložnih struja i gubitaka jezgre. Ta dodatna toplina može imati značajan utjecaj na smanjenje životnog vijeka izolacije transformatora. U industrijskim primjenama u kojima su transformatori primarno opterećeni nelinearnim opterećenjima, kontinuirani rad na ili iznad nazivne snage može nametnuti visoku radnu temperaturu, koja može imati značajan utjecaj na njihov vijek trajanja, no zbog toga su transformatori energetska oprema koja je značajno napredovala, pa mogu raditi u okruženjima sa značajnim harmonijskim izobličenjem uz minimalne gubitke [5].

U jednofaznim strujnim krugovima povratne struje koje nose značajne količine harmonijskih komponenti protječu kroz neutralni vodič transformatora povećavajući efektivnu struju. Stoga, rad transformatora u harmonijskim sredinama zahtijeva da se neutralizirane struje vrednuju u uzemljenim spojenim transformatorima kako bi se izbjegla mogućnost propuštanja uzemljenja kao posljedice preopterećenja. U uravnoteženim trofaznim sustavima nema struje u neutralnom vodiču, za čiju bi se prisutnost neutralnih struja u tim uvjetima trebala pripisati cirkulaciji nultog harmonika, koji se uglavnom proizvode jednofaznim napajanjem. U sustavima koji nisu potpuno uravnoteženi, neuravnotežena struja cirkulira na povratnom (neutralnom) vodiču. Budući da je ovaj vodič obično iste veličine kao i fazni vodiči za rukovanje ne-uravnoteženim strujama, može doći do pregrijavanja ako se te struje naknadno pojačavaju nultim strujama[5].

Veliki broj računala u uredskim zgradama čini izuzetan izvor harmonijskih struja koje stvaraju njihovi elektronički izvori napajanja. Uobičajena je praksa da veličina neutralnih vodiča prenosi do dvaput više od efektivne struje koju mogu uzeti fazni vodiči. Praćenje porasta temperature na neutralnom vodiču transformatora može biti dobar početak za otkrivanje da li su nulti vodiči preopterećeni strujnim harmonicima. To je točno sve dok sustav ne uzrokuje povećanu razinu neuravnoteženosti struje koja bi uzrokovala porast temperature neutralnog vodiča [5].

Rezonantni uvjeti uključuju reaktanciju kondenzatorske baterije koja je u rezonantnoj frekvenciji jednaka induktivnoj reaktanciji distribucijskog sustava. Ta dva elementa kombiniraju se kako bi proizveli serijsku ili paralelnu rezonanciju. U slučaju serijske rezonancije, ukupna impedancija na rezonantnoj frekvenciji svodi se isključivo na otporničku komponentu kruga. Ako je ova komponenta mala, razviti će se velike vrijednosti struje na takvoj frekvenciji. U slučaju paralelne rezonancije, ukupna impedancija na rezonantnoj frekvenciji je vrlo velika (teoretski teži beskonačnosti). Ovaj uvjet može proizvesti veliki prenapon između paralelno spojenih elemenata, čak i pod malim harmonijskim strujama. Stoga, rezonantni uvjeti mogu predstavljati opasnost za izolaciju kabela i namota transformatora, kao i za kondenzatorske baterije i njihove zaštitne uređaje. Rezonantne frekvencije se mogu izračunati ako je poznata razina struje kratkog spoja na mjestu gdje je instalirana kondenzatorska baterija prema slijedećoj jednadžbi (3-1);[5]:

$$f_r = \sqrt{\frac{kVA_{short\_circuit}}{kVAR_{cap\_bank}}} \quad (3-1)$$

gdje je:

$f_r$ - rezonantna frekvencija

$kVA_{short\_circuit}$  – snaga KS.

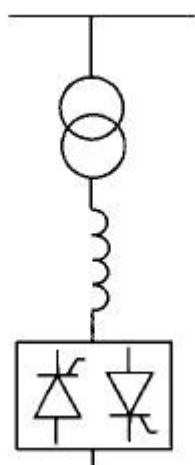
$kVAR_{cap\_bank}$  – snaga kondenzatorske baterije

Može se primijetiti kako mijenjanje bilo kojeg od ovih parametara može promijeniti rezonantnu frekvenciju. To je praksa koja se ponekad koristi gdje je vidljivo pretjerano grijanje u transformatorima spojenim na nelinearna opterećenja. Ako se ta frekvencija poklapa s karakterističnim harmonikom koji je prisutan, ta struja će imati veliku impedanciju, a postojeće harmonijsko izobličenje napona bit će pojačano[5].

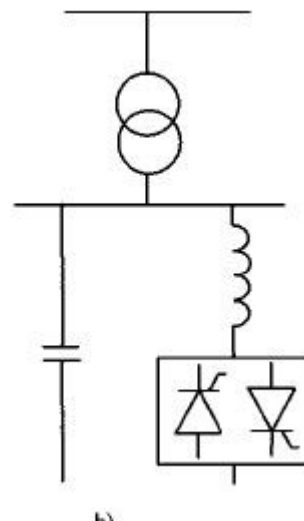
Kondenzatorske baterije mogu se primijeniti bez većih posljedica za rezonantne uvjete sve dok su nelinearna opterećenja i kapaciteti manji od 30% odnosno 20%, nazivne vrijednosti kVA transformatora, uz pretpostavku tipične impedancije transformatora od 5% do 6%. Inače bi se kondenzatori trebali koristiti kao harmonijski filter, sa serijskim induktivitetom koji ih podešava na jedan od karakterističnih harmonika opterećenja. Općenito, peti i sedmi harmonici su najčešće pronađeni i objašnjavaju najveće harmonijske struje. Kao što je ranije spomenuto, efektivne vrijednosti napona i struje mogu se povećati pod harmonijskim izobličenjem. To može proizvesti neželjeno djelovanje osigurača u vodovima industrijskih postrojenja koja upravljaju velikim nelinearnim opterećenjima. Kondenzatorske baterije mogu se dodatno naglasiti pod djelovanjem osigurača na jednoj od faza, što ostavlja preostale jedinice spojene preko drugih faza. Tako ih se ostavlja pod neuravnoteženim naponskim uvjetima koji mogu proizvesti prenapone i rastaviti pasivne harmonijske filtre ako nisu opremljeni značajkom detekcije neravnoteže sustava[5].

Statički var kompenzatori (SVC) primijenjeni su za kompenzaciju treperenja od kraja 1970-ih. Trenutno predstavljaju jednu od najčešće korištenih metoda za kompenzaciju treperenja u instalacijama lučnih peći. SVC je šantni uređaj fleksibilnog AC prijenosnog sustava (FACTS) koji koristi energetske elektrone za kontrolu protoka jalove snage. Pojam statički koristi se za razlikovanje SVC od rotirajućih var kompenzatora (sinkroni motori ili generatori). SVC regulira napon na svojim stezaljkama kontroliranjem količine reaktivne snage koja se ubrizgava ili apsorbira iz elektroenergetskog sustava.

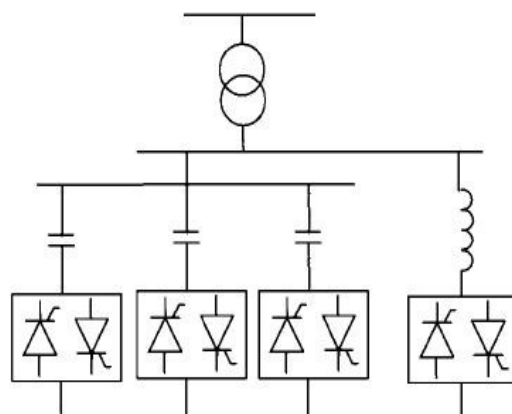
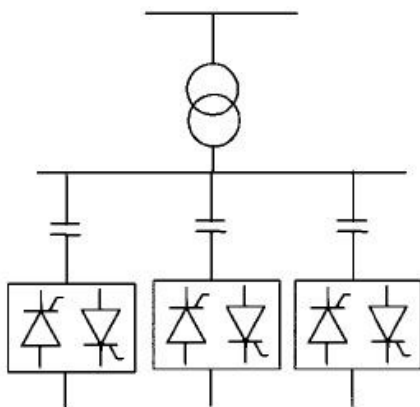
Kada je napon sustava nizak, SVC generira reaktivnu snagu (kapacitivno ponašanje). Na taj način SVC osigurava potražnju za jalovim opterećenjem, a vodovi ne obavljaju prijenos snage. Kao rezultat, pad napona se smanjuje, a napon na terminalima opterećenja se povećava. Slično tome, kada je napon sustava visok, SVC apsorbira reaktivnu snagu (induktivno ponašanje). SVC se obično sastoji od dvije paralelne grane povezane na sekundarnoj strani spojnog transformatora. Jedna od tih grana sastoji se od tiristorski kontrolirane zavojnice (TCR) (slika 3.1[6]), a u drugom je postavljena kondenzatorska baterija koja služi kao filter (slika 3.2[6]). Varijacija jalove snage postiže se kontroliranjem vremena paljenja tiristora i struje koja teče zavojnicom. Druga mogućnost je uporaba tiristorski paljenog kondenzatora (TSC) (slika 3.3[6]). U tom se slučaju svaka kondenzatorska baterija uključuje i isključuje pomoću tiristora. Time se može postići diskretna varijacija jalove snage, ali nikad neprekidna kao u TCR[6].



Slika 3.1. Tiristorski kontrolirana zavojnica;[6]



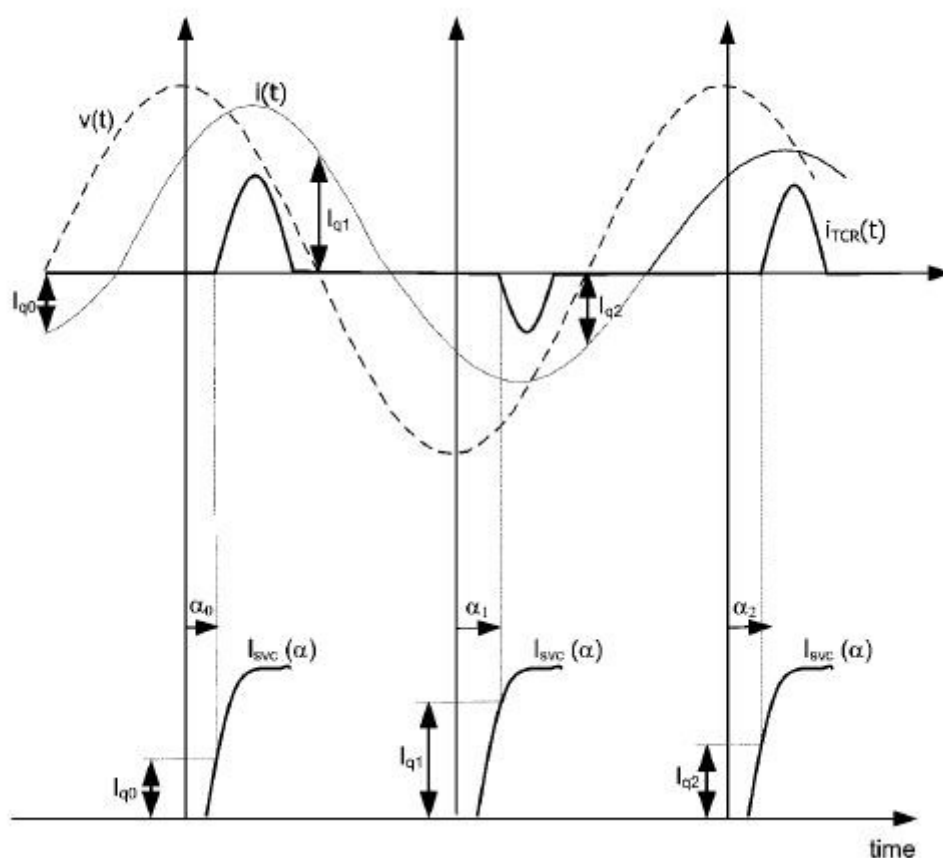
Slika 3.2. Tiristorski kontrolirana zavojnica sa filtrom;[6]



Slika 3.3. Tiristorski paljeni kondenzato;[6]r

Slika 3.4. Kombinacija;[6]

Konačno, neke strukture koje kombiniraju TCR i TSC također se mogu koristiti (Slika 3.4.[6]). Kontrola SVC-a temelji se na mjerenju reaktivne komponente struje opterećenja i određivanju kuta paljenja na takav način da SVC ubrizgava ili apsorbira količinu reaktivne snage potrebne za kompenzaciju. Ova metoda kontrole je objašnjena pomoću slike 3.5[6].



Slika 3.5. SVC metoda;[6]

U trenutku prolaska napona kroz nulu mjeri se struja opterećenja i vrijeme  $t$ . U ovom trenutku, aktivna komponenta struje opterećenja je nula jer je aktivna komponenta struje u fazi naponskog vala. Stoga je struja izmjerena u trenutku prijelaza nultog napona jednaka reaktivnoj komponenti struje opterećenja. Na taj način se reaktivna struja izmjerena u određenom polu-ciklusu koristi za određivanje trenutka paljenja tiristora u sljedećem polu-ciklusu. Pri tome se regulira struja preko zavojnice (u slučaju TCR-a) i može se kontrolirati i ukupna reaktivna struja koju ubrizgava pretvarač. Jedno od glavnih ograničenja ove vrste kontrole za kompenzaciju brzih fluktuacija je inherentno kašnjenje njegova načina rada[6].

Postoji vremenski interval između trenutka mjerenja reaktivne komponente (u jednom polu-ciklusu) i trenutka uključanja tiristora (u sljedećem polu-ciklusu). Kada se jednom aktiviraju, ventili tiristora moraju ostati vodljivi sve dok se ne dogodi prirodna komutacija. S druge strane, važno je uzeti u obzir da SVC može točno kontrolirati trenutnu temeljnu komponentu, ali proizvodi harmonijske komponente. Iz tog razloga, općenito, potrebno je instalirati filtre kako bi se smanjio sadržaj harmonika ubačen u mrežu kompenzacijskim sustavom. [6].

Važan aspekt kojim se treba pobrinuti s dolaskom kogeneracijskih i mikro-turbinskih shema pomoću pretvarača snage s elektroničkom prekidačkom tehnologijom bit će njihov harmonijski doprinos struje i kako to može utjecati na radni učinak zaštitnih releja u otočnom sustavu. Poput transformatora, rotacijski strojevi izloženi su toplinskim učincima harmonika. Budući da se efektivni otpor vodiča povećava kako frekvencija raste, strujni val bogat harmonicima može uzrokovati veće zagrijavanje vodiča od sinusnog vala istih efektivnih vrijednosti. Ukupni učinak može dovesti do smanjenja vijeka trajanja rotacijskih strojeva[5].

Generatori koji se koriste u elektroenergetici temeljno su dizajnirani za napajanje linearnih opterećenja. Međutim, kada je tip opterećenja pretežno nelinearan, sustavi proizvodnje moraju udovoljavati određenim zahtjevima koji im omogućuju rad u stabilnim uvjetima i bez izlaganja prekomjernom grijanju i vibracijama torzijskog momenta, što može dovesti do prekoračenja dopuštenih radnih granica. U osnovi, nelinearno opterećenje proizvodi izobličenja valnog oblika napona na priključcima generatora; a to nameće sljedeće posljedice u radu generatora:

1. proizvodnja pozitivnih i negativnih strujnih doprinosa koji stvaraju torzijske momente i vibracije na osi motora. Termodinamičke sile koje nastaju u rotoru mogu prijevremeno istrošiti ležajeve vratila;
2. izobličenje valnog oblika napona na krugu napajanja u sustavu uzbude; to može proizvesti probleme s regulacijom napona;
3. prekomjerne struje negativnih sekvenci mogu pridonijeti povećanju debalansa napona. [5].

### **3.2. Mjerenje harmonika**

Cjelokupno pitanje mjerenja elektroenergetskog sustava usmjereno je na prikupljanje relevantnih podataka za pomoć u planiranju i radu sustava u nizu aspekata ključnih za učinkoviti prijenos i distribuciju električne energije. Dispečer trafostanice prati faktor snage kako bi se osigurala ravnoteža između aktivne i jalove snage te minimizirali gubici distribucijskog sustava. Drugi važni čimbenici za praćenje su napon i frekvencija sustava koji moraju ostati unutar zadanih granica, te da proizvedena električna energija slijedi predviđenu potražnju[5].

Drugi relevantni aspekt mjerenja je koordinacija zaštitnih uređaja, koja slijedi unaprijed određene postavke koje omogućuju da zaštitni uređaji prekinu strujni krug kao odgovor na velike struje koje su identificirane kao greške. Međutim, neki releji imaju sposobnost provoditi mjerenja struje koristeći iznos struje kratkog spoja, te pomoću nje izračunati približnu udaljenost od mjesta kvara. Sustavi koji koriste veći broj ovakvih releja zovu se SCADA sustavi (Supervisory Control And Data Acquisition, tj. nadzorna kontrola i prikupljanje podataka) koji komuniciraju sa terminalnim jedinicama trafostanice, pametnim relejima i sustavima automatizacije trafostanica za praćenje stanja mreže u stvarnom vremenu i pružaju daljinsko upravljanje uređajima kao što su prekidači, kondenzatorske baterije te regulatori napona[5].

Mjerenja se provode po normama koje služe za lakše snalaženje te prikupljanje mjernih podataka, koji će se moći lakše analizirati. Jedna od brojnih normi je IEEE 519 izrađena 1992 godine, koja sugerira da se srednja vrijednost  $\langle 15\text{-minutnih}; 30\text{-minutnih} \rangle$  vrijednosti iz 12 intervala u godini treba koristiti kao struja opterećenja  $I_L$  za određivanje omjera  $I_{SC}/I_L$ . Norma IEC61000-4-7, razmatra mjerenja napona i struje za dobivanje

spektralnog sadržaja do 40. harmonika, koristeći intervale od 200 ms. Trajanje mjerenja harmonika ovise o vrsti potrošača (kućanstva, obrti, industrija). Za detaljniji uvid u norme koristiti literaturu: Francisco C. De La Rosa, Harmonics and power systems[5].

Ako je potrošač kućanstvo onda je lakše predvidjeti vrstu trošila, te prema tome i harmonijski sadržaj, dok se harmonijski sadržaj kod većih potrošača ne može lako predvidjeti zbog različitih opterećenja. Proces zahtijeva da instrumenti za mjerenje, kao i pretvarači napona i struje, budu u skladu s određenim karakteristikama kako bi se dobili što bolji uzorci. Propusnost analognog ulaza odnosi se na granicu frekvencije iznad koje se signal prigušuje za više od 3 dB. Norma IEEE-519-3 preporučuje da se koristi širina pojasa od  $3 \pm 0,5$  Hz između točke s minimalnim prigušenjem od 40 dB pri frekvenciji od  $f_h + 15$  Hz. Propusnost analognog ulaza od 1,5 kHz ograničila bi mjerenje harmonika do 25. harmonika u 60-Hz sustavu i do 30. harmonika u 50-Hz sustavu. S obzirom na Nyquistov kriterij, ako ulazni signal sadrži frekvencije veće od polovice frekvencije uzorkovanja, signal se ne može ispravno protumačiti, te će biti potrebna širina pojasa analognog ulaza veća od 3 kHz[5].

Da bi se sve struje ispod 65 harmonika ispravno obradile, frekvencija uzorkovanja trebala bi biti najmanje dvostruko veća od ulazne propusnosti ili 8000 uzoraka u sekundi u ovom slučaju, za pokrivanje 50Hz i 60-Hz sustava. Zahtjev je za 95% ili veću točnost i minimalno potrebno prigušenje od (50 do 60)dB za 30 Hz; (30 do 50)dB za (120 do 720)Hz; (20 do 40)dB za (720 do 1200)Hz; i (15 do 35)dB za signale od (1200 do 2400)Hz[5].

Pretvarači pretvaraju parametre u mjerne signale odgovarajuće amplitude za obradu mjernom opremom. Međutim, nije važna samo amplituda, nego i da frekvencijski odziv ima odgovarajuću propusnost kako ne bi proizveo izobličenje signala. Kao pretvarači koji zadovoljavaju ove zahtjeve, mogu se koristiti sljedeći[5]:

- Naponski mjerni transformatori (NMT);
- Strujni mjerni transformatori (SMT).

Ovisno o naponu sustava, konfiguraciji mreže i vrsti opterećenja, napon se može mjeriti izravno ili preko NMT-a. S obzirom na struju mjerenja se mogu provoditi na primarnoj strani uporabom strujnih sondi opremljenih mjernom opremom ili na niskonaponskoj strani, obično na lokaciji mjernog uređaja. Pod nesigurnošću u vezi s njihovim frekvencijskim odzivom, pretvarači bi trebali biti podvrgnuti ispitivanjima kako bi se utvrdilo je li njihov propusni opseg dovoljan za provođenje harmonijskih mjerenja. Iako norma IEEE-519 ističe



da se većina mjernih uređaja može koristiti s preciznošću od 97% u frekvencijskom rasponu do oko 5 kHz, preporučuje se da se ispitivanja provode na NMT-u kako bi se utvrdilo je li njihova širina pojasa prikladna do frekvencije od interesa[5].

U slučaju SMT-a (koji su instalirani na trafostanici od strane elektroprivrede za mjerenja električne struje i Wh), oni imaju frekvencijski opseg do 20 kHz uz pogrešku manju od 3%. Za kratke udaljenosti od mjerne opreme (u skladu s IEEE 518-1992) preporučuju se pravilno uzemljeno oklopljeni koaksijalni kabeli. Ako su udaljenosti veće od nekoliko desetaka metara, preporuča se veza optičkim kabelima kako bi se izbjegli svi oblici smetnji na signale malih amplituda[5].

Za održavanje kvalitete električne energije potrebni su standardi za mjerenja kako bi se pronašli izvori problema. Praksa u vezi s praćenjem električnih parametara pokazuje da se mjerenja trebaju provoditi barem u PCC-u i na čvorovima gdje su nelinearna opterećenja povezana. Prva lokacija je važna jer se u tom području mora tražiti usklađenost sa standardima, a druga za provjeru graničnih vrijednosti emisija na nelinearnim lokacijama opterećenja. To se zapravo može napraviti na mrežnim čvorovima koji grupiraju niz sličnih nelinearnih opterećenja ili na pojedinačnim točkama s jednim, velikim harmonijskim opterećenjem[5].

Treba imati na umu da ako se filtriranje harmonika smatra mogućom opcijom u velikim industrijskim postrojenjima, gdje će troškovi često odrediti mjesto filtera, a time i točku za praćenje, a to omogućuje provjeru učinkovitosti primijene filtriranja. Ako su zanimljivi međuharmonici (neparni višekratnici temeljne frekvencije u ciklokonvertorima, elektrolučnim zavarivačima i električnim pećima), potrebno je koristiti opremu za praćenje kvalitete električne energije s odgovarajućom širinom i točnošću[5].

### **3.3. Tehnike filtriranja harmonijskog sadržaja**

U općem kontekstu, filtre harmonika možemo podijeliti na pasivne, aktivne i hibridne filtre. Njihova glavna razlika je da li oni pružaju (pasivno) djelovanje filtriranja unutar odabranog opsega ili kao rezultat procesa praćenja u realnom vremenu (aktivnog) koji dovodi do ubrizgavanja harmonijskih struja u realnom vremenu[5].

Jedna od najčešćih metoda za kontrolu harmonijskog izobličenja u industriji je uporaba pasivnih tehnika filtriranja koje koriste jednostruke ili pojasne filtre. Pasivni harmonijski filtri mogu biti dizajnirani kao pojedinačno podešeni elementi koji osiguravaju put niske impedancije harmonijskim strujama na točnoj frekvenciji ili kao propusni uređaji koji mogu filtrirati harmonike preko određenog frekvencijskog opsega. Vjerojatno najčešći harmonijski filter u industrijskim primjenama, pasivni filter predstavlja vrlo nisku impedanciju na frekvenciji ugađanja, kroz koju će se preusmjeriti sva struja te određene frekvencije. Prema tome, konstrukcija pasivnog filtra mora uzeti u obzir očekivani rast harmonijskih izvora struje, jer se inače može izložiti preopterećenju koje se može brzo razviti u ekstremno pregrijavanje i toplinski proboj[5].

Dizajn pasivnog filtra zahtijeva precizno poznavanje elektroenergetskog sustava i opterećenja koje proizvodi harmonik. Često je potrebno mnogo rada na simulaciji kako bi se testirala njegova izvedba pod različitim uvjetima opterećenja ili promjenama u topologiji mreže. Budući da pasivni filtri uvijek osiguravaju reaktivnu kompenzaciju do stupnja diktiranog iznosom voltampera i napona korištenog kondenzatora, koji mogu zapravo biti dizajnirani za dvostruku svrhu osiguravanja djelovanja filtriranja i kompenzirajućeg faktora snage na željenu razinu. Ako se koristi više filtera - na primjer, setovi od 5. i 7. ili 11. i 13. grane - bit će važno zapamtiti da će svi osigurati određenu količinu reaktivne kompenzacije. Kao što smo već spomenuli, pasivni filter je serijska kombinacija induktivnosti i kapacitivnosti. U stvarnosti, u odsustvu fizički dizajniranog otpornika, uvijek će postojati serijski otpor, što je stvarni otpor serije reaktora koji se ponekad koristi kao sredstvo za izbjegavanje pregrijavanja filtra. Sve harmonijske struje čija se frekvencija poklapa s frekvencijom podešenog filtra, naći će putanju niske impedancije kroz filter. Rezonantna frekvencija pasivnog filtra može se izraziti sljedećim izrazom(3-2);[5]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-2)$$

Gdje je:

$f_0$  - rezonantna frekvencija u Hz

L – induktivnost u H

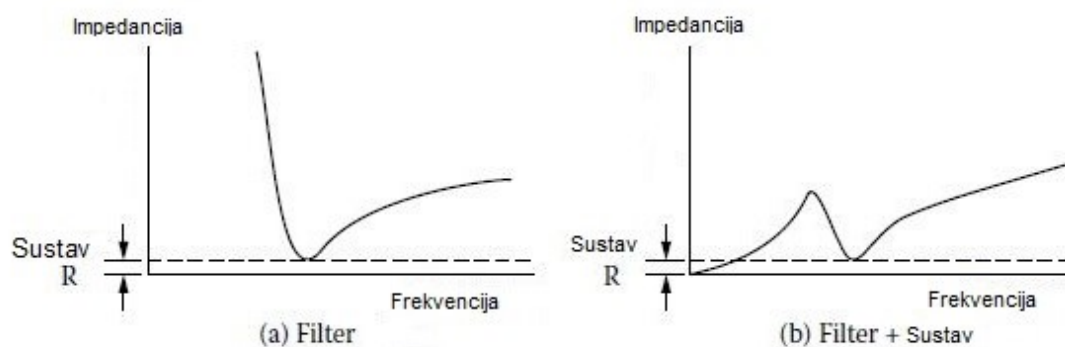
C – kapacitivnost u F

Niskonaponski filtri (480 do 600 V) koriste željezne jezgre s zračnim prostorom koje imaju povećane gubitke, ali su povezane s niskim  $Q_f$  vrijednosti. SN filtri (4,16 do 13,8 kV) imaju  $Q_f$  vrijednosti u gornjem rasponu. Odnos između  $X / R$  NN sustava kreće se između 3 i 7. Ovi sustavi ne predstavljaju povišeni paralelni rezonantni vrh u Z-f karakteristici. Iako NN filtri imaju povećane gubitke, oni također osiguravaju veće prigušenje za bilo kakve oscilacije prisutne u sustavu. Proces dizajniranja filtra kompromis je između nekoliko čimbenika: održavanje, ekonomičnost i pouzdanost. Dizajn najjednostavnijeg filtra koji radi traženi posao je ono što će se koristiti u većini slučajeva. Koraci za postavljanje harmonijskog filtra pomoću osnovnih odnosa koji omogućuju pouzdan rad mogu se sažeti u slijedeće[5]:

1. Izračunavanje vrijednosti kapacitivnosti koja je potrebna za poboljšanje faktora snage i za uklanjanje svake kazne od strane elektroenergetske tvrtke  
Kompenzacija faktora snage općenito se primjenjuje za povećanje faktora snage na oko 0,95 ili više
2. Odabiranje reaktancije za podešavanje serijskog kapaciteta na željenu frekvenciju harmonika, npr. u 6-pulsnom pretvaraču, to bi započelo na petom harmoniku i uključivalo bi niže frekvencije u primjeni lučne peći
3. Izračunavanje vršnog napon na priključcima kapaciteta pri efektivnoj reaktivnoj struji
4. Odabiranje standardne komponente za filter i provjera rada filtra kako bi se osiguralo da komponente kapaciteta rade unutar preporučenih ograničenja IEEE-18 2, što može zahtijevati nekoliko ponavljanja sve dok se ne postigne željeno smanjenje harmonijskih razina

Pasivni filtri nose struju koja se može izraziti kao dio struje opterećenja na temeljnoj frekvenciji. Što se tiče njihove cijene, oni su skuplji od serijskih zavojnica koji se često koriste da bi se postiglo harmonijsko prigušenje, ali oni imaju prednost u osiguravanju reaktivne snage na osnovnoj frekvenciji. U praktične svrhe, oni se u velikoj mjeri koriste u industriji. Dizajniranje filtra obično nudi robustan mehanizam koji osigurava neke manje akcije filtriranja za dio drugih harmonijskih struja čiji je poredak blizu frekvencije ugađanja, pod uvjetom da nema filtera podešenih na tim frekvencijama. Impedancija filtra mora biti

manja od impedancije koju prikazuje sustav na frekvenciji ugađanja. U niskonaponskim sustavima u kojima je omjer  $X / R$  mali, pojedinačni filter može biti dovoljan da osigura potrebno prigušenje. Na primjer, zanemarujući stvarni otpor serijske reaktancije u harmonijskom filteru, najniža vrijednost karakteristike impedancijske frekvencije na slici 3.6.[5], kao što se vidi iz izvora, proizlazi iz otporničke komponente sustava. Položaj ove točke na y-osi na frekvenciji podešavanja bio bi oko tri puta veći za mrežu s  $X / R$  omjerom od 10 u usporedbi s slučajem u kojem je  $X / R$  jednak 3. Otporna komponenta sa teoretski nultim otporom učinila bi da filter apsorbira čitavu harmoničnu struju frekvencije jednake frekvenciji ugađanja filtra. Ponekad je uključen niz otpornih komponenti za kontrolu maksimalne dopuštene struje kroz filter. To će utjecati na faktor kvalitete filtra kao što je opisano u jednadžbi (3-3),[5].



Slika 3.6. Frekvencijski odziv harmonijskog filtra,[5]

$$Q_f = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} \quad (3-3)$$

Impedancija grane filtra računa se pomoću izraza (3-4),[5]:

$$Z = R + j[\omega L - \frac{1}{\omega C}] \quad (3-4)$$

gdje su  $R$ ,  $L$  i  $C$  otpor, induktivnost i kapacitivnost filtarskih elemenata, a  $\omega$  je kutna frekvencija elektroenergetskog sustava. Uvjet rezonancije serije je pobuđen kada je imaginarni dio impedancije jednak nuli, gdje je preostala samo impedancijska komponenta otpora. Frekvencija na kojoj je filter podešen tada se definira sa vrijednošću  $\omega$ , koja inducira induktivnu i kapacitivnu reaktanciju u jednadžbi (3-4);[5]). Ta se frekvencija daje jednadžbom (3-2),[5].

Ako napravimo omjer između harmonika i temeljnih frekvencija sustava, induktivna i kapacitivna reaktancija na frekvenciji harmonika mogu se međusobno izjednačiti (3-7;[5]):

$$X_{Lh} = h\omega_L \quad (3-5)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{h\omega_C} \quad (3-6)$$

Izražen na drugačiji način, uz pretpostavku nultog otpora, uvjet za impedanciju u jednadžbi (3-4) pomoću jednadžbi (3-5;[5],3-6;[5]),jednak je nuli, te pri frekvenciji ugađanja zahtijeva[5]:

$$X_{Lh} = X_{Ch} \quad (3-7)$$

Ubacivši jednadžbu (3-5) i jednadžbu (3-6) u jednadžbu (3-7) i rješavajući varijablu  $h$ , dobivamo jednadžbu(3-8) [5]:

$$h = \frac{X_C}{X_L} \quad (3-8)$$

Pasivni i aktivni filtri mogu se ugraditi u serijske i paralelne (shunt) konfiguracije. Serijska rješenja rade u skladu s opterećenjem, što znači da jedinice moraju biti dimenzionirane za punu struju. Sklopovi se mogu dimenzionirati samo za harmonijsko izobličenje. Najjednostavnije serijsko-pasivno rješenje može se postići pomoću linijskog induktiviteta, kao što je trofazna zavojnica postavljena ispred ispravljača. Linijski induktivitet osigurava ekonomičan način smanjenja harmonika struje uz dodavanje razine zaštite ispravljaču. Međutim, on nije savršen, nije prikladan za velike pogone i neće moći samostalno udovoljiti IEEE519 standardima. Posljednje serijsko-pasivno rješenje je mulati-puleni transformator s više namota s faznim pomakom. Budući da svaki sekundarni namota ima svoj ispravljač, 18-pulsa konfiguracija može ciljati i učinkovito poništiti djelovanje18., 19., 35. i 37. harmonika[7].

Sljedeća opcija je korištenje serijskog harmonijskog filtra. Pruža učinkovitiju kompenzaciju od linijske zavojnice, značajno smanjujući ukupno harmonijsko izobličenje

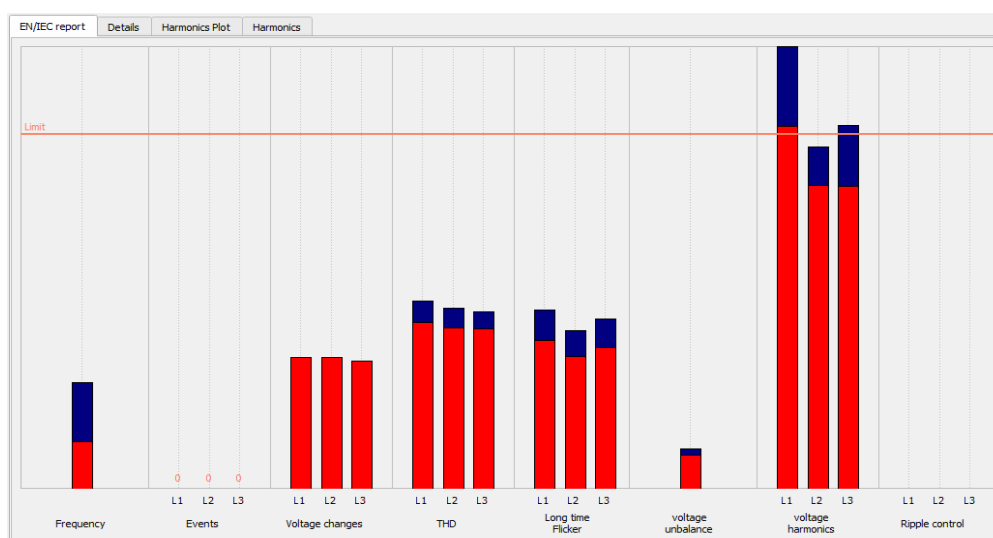
(THD). Iako serija harmonijskih filtera dobro funkcionira kao "hvataljka", osjetljiva je na mrežu i može dovesti do interakcije. Također je glomazna i nije osobito prikladna za dinamičke aplikacije, najbolje radi na crpkama i ventilatorima na razumno dobro uravnoteženoj mreži. Svaka neuravnoteženost napajanja može prouzročiti oštećenja uslijed preopterećenja i pregrijavanja. Serijskim filtrima harmonika nedostaje mogućnost nadogradnje, nadzora i redundancije, što znači da ovakva vrsta filtera nije pogodna za složenije zadatke. Serijski aktivan filter poprima oblik aktivnog front-end (AFE) VSD-a. On zamjenjuje ispravljačke diode u redovnom VSD-u s IGB-kontroliranim ispravljačem kako bi se uklonio šum na temelju signala[7].

Konačno, za shunt-active rješenja, korisnici mogu razmotriti aktivne filtre. Oni koriste IGBT tehnologiju i posebno su prilagođeni VSD harmonicima. Oni mogu poništiti harmonijske frekvencije ubrizgavanjem jednakih i suprotnih strujnih frekvencija. Filtri s aktivnim upravljanjem osiguravaju najučinkovitiju harmoničku kompenzaciju u kompaktnom uređaju koji ima mali gubitak, neosjetljiv je na mrežne uvjete, ne može se preoptereti i lako se može nadograditi. Također, paralelno s opterećenjem omogućuje se ugrađivanje zalihosti. Sve to dolazi s nešto većom cijenom, što se nadoknađuje boljim povratom ulaganja tijekom dužeg razdoblja[7].

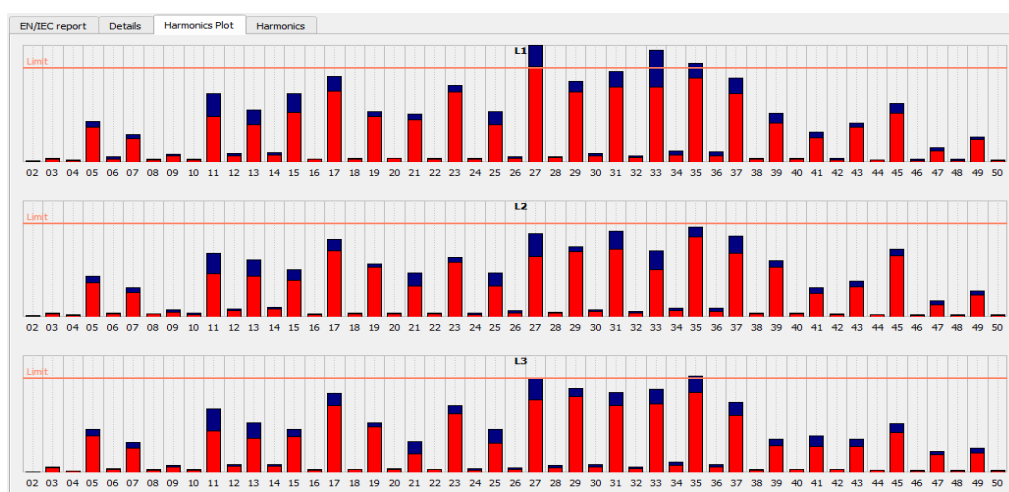
## 4. ANALIZA MJERNIH REZULTATA

Kvaliteta električne energije izmjerena je u tvornici bombona i čokolade Kandit d.o.o. u Osijeku, u pogonu za obradu kakaovca, na mjernom mjestu priključka stroja pod nazivom Konča koja služi za miješanje kakao mase s ostalim sastojcima kao što su: kakao maslac, šećer, biljna mast, itd... Analiza je obavljena pomoću programskog paketa WinPQmobil.

U analizi za navedeno razdoblje (1. tjedan- 06.03.2018-13.03.2018; 2. tjedan- 13.03.2018-20.03.2018) vidljivo na slici 4.1., svi uvjeti kvalitete električne energije zadovoljavaju normu EN 50160, osim 27. harmonika napona u fazi L1, kao što je vidljivo i na slici 4.2.

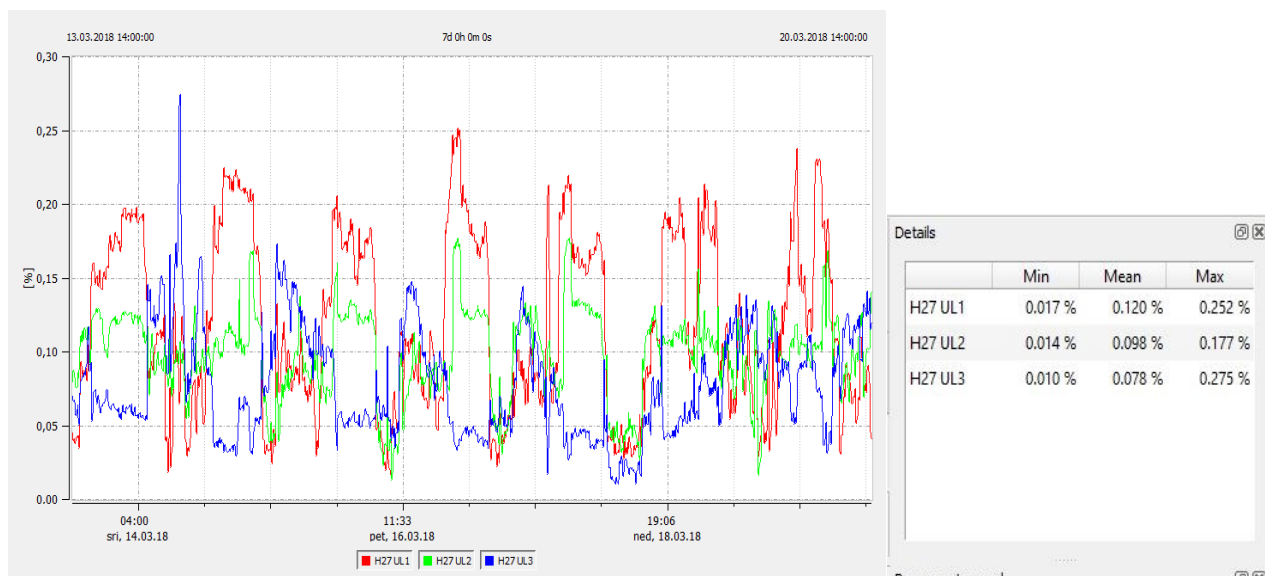


Slika 4.1. Mjerni rezultati za razdoblje 13.03.2018-20.03.2018



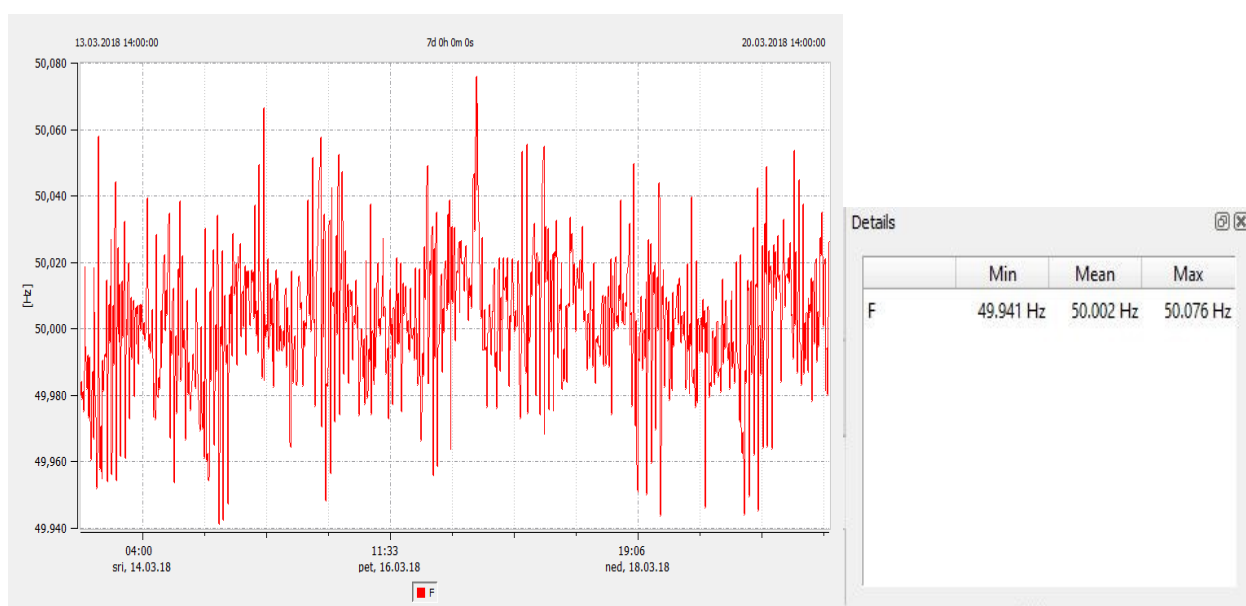
Slika 4.2. Harmonijska analiza po fazama

Na slici 4.3. analiziran je 27. harmonik, čiji je maksimum 0.275% u fazi L3, normom EN 50160 nije propisano ograničenje za neparne harmonike veće od 25. reda. Dok je u samom programu postavljeno ograničenje na 0.2%, te zbog toga program pronalazi odstupanje od norme EN 50160 na slikama 4.1. i 4.2.



Slika 4.3. Analiza 27.harmonika

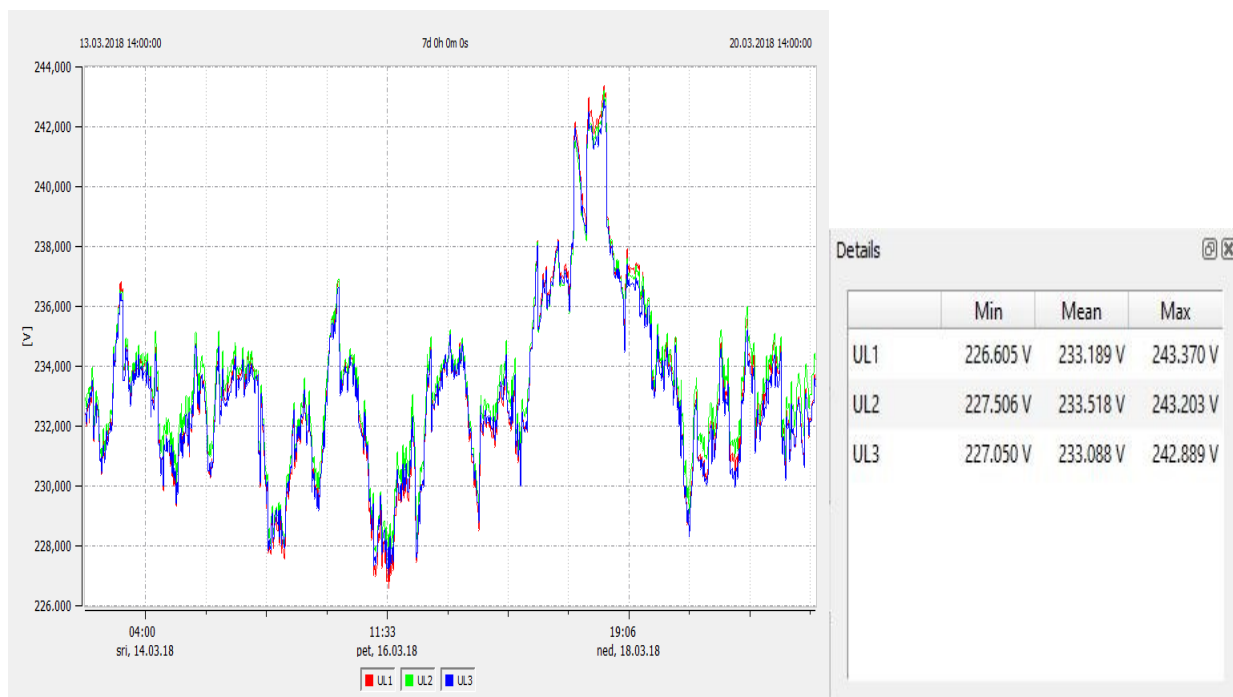
Na slici 4.4. prikazana je analiza frekvencije koja po normi EN 50160 zadovoljava jer je u dopuštenim granicama  $\pm 1\%$   $f_n$  za 99,5% vremena u godini.



Slika 4.4. Analiza frekvencije

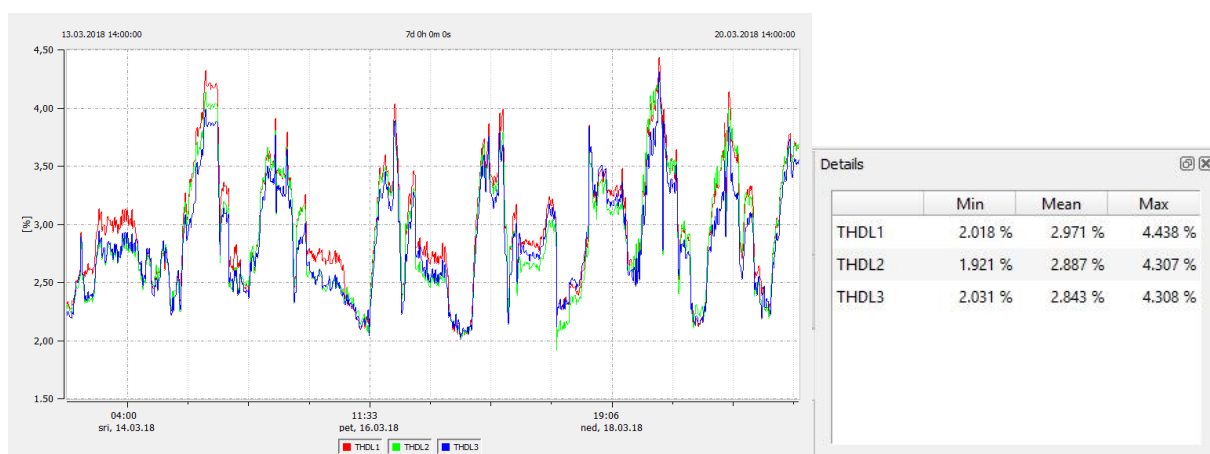


Na slici 4.5. vidljivo je u podacima iz tablice da vrijednosti napona u sve tri faze ne prelaze  $\pm 10\% U_n$ .



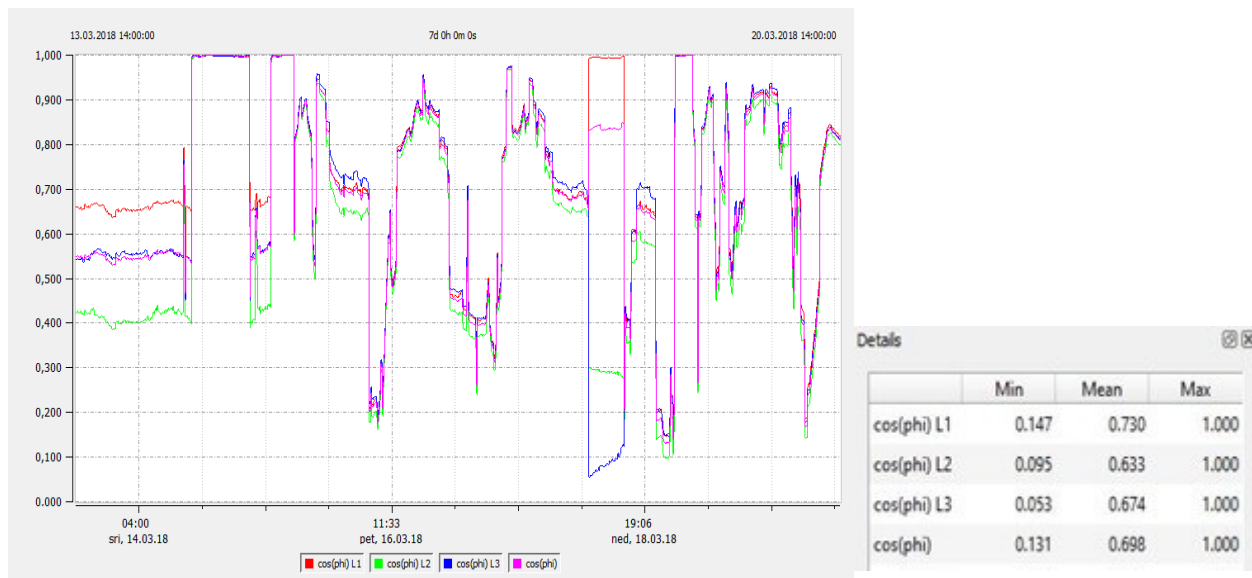
Slika 4.5. Analiza napona

Na slici 4.6. analiziran je THDU, koji u svim fazama zadovoljava jer je manji od  $8\% \times U_n$



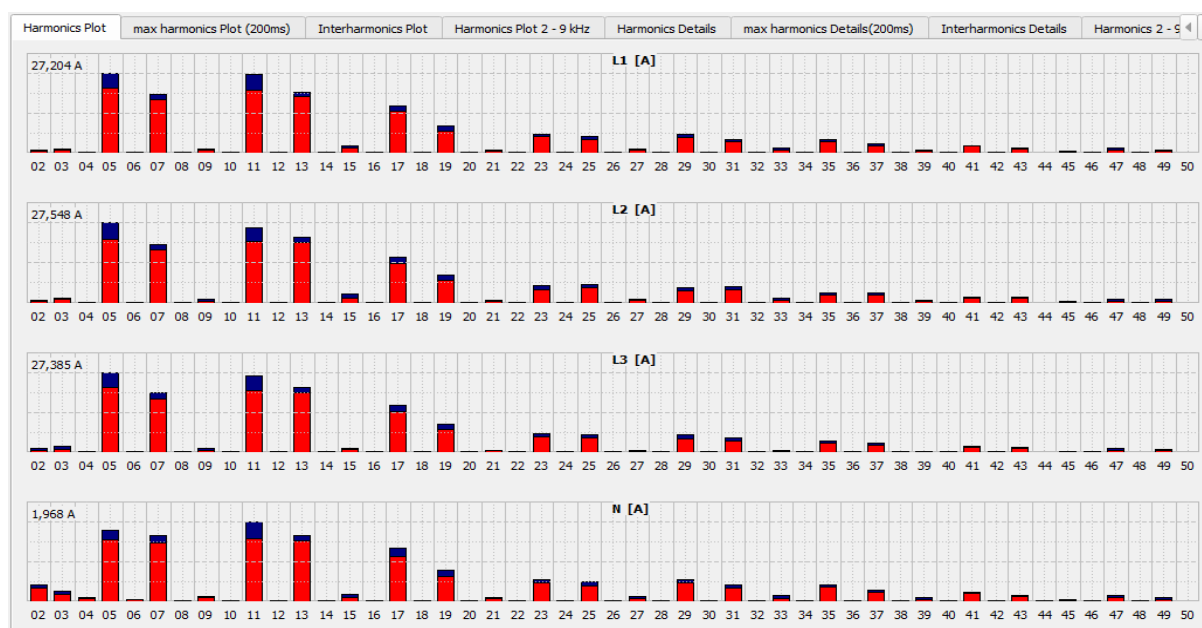
Slika 4.6. THDU

Na slici 4.7. analiziran je  $\cos\phi$  gdje je vidljivo da nema optimalan iznos 1, što bi značilo da trošila koja su priključena na mjernom mjestu nisu radnog karaktera nego pretežno reaktivnog.



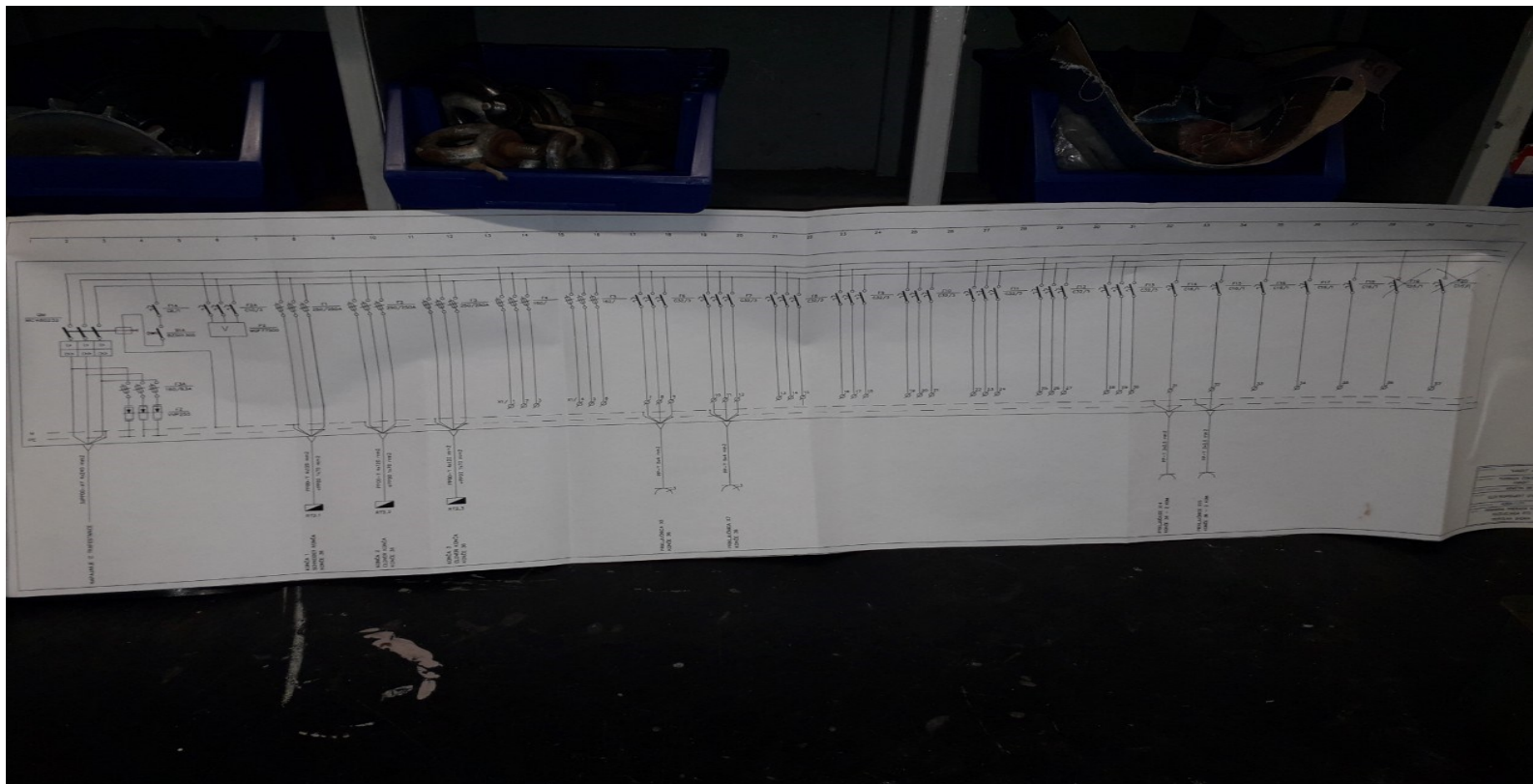
Slika 4.7.  $\cos\phi$

Na slici 4.8. prikazane su vrijednosti strujnih harmonika po fazama, te je analizom utvrđeno da je vrijednost struje 27. harmonika zanemarivog iznosa.



Slika 4.8. Strujni harmonici

Na slici 2.9. shematski je prikazano mjerno mjesto, gdje se nalazi stroj Konča koji je napajan pomoću trofaznog sustava.



Slika 2.9. Shematski prikaz mjernog mjesta

## 5.ZAKLJUČAK

Povećanjem korištenja elektroničkih uređaja pojačana je i potreba za rekonstrukcijom distribucijske mreže kako bi sustav ostao u ravnoteži. Donesene su norme kojih bi se elektroprivredna poduzeća morala pridržavati pri prodaji električne struje kao energenta, te i kupci kako bi svojim djelovanjem održali kvaliteu električne energije. Norma EN 50160 daje ograničenje za pokazatelje kvalitete električne energije kao što su: naponski propadi i prekidi, naponska kolebanja, harmonici i međuharmonici, prijelazni prenaponi, valovitost, tranzijentni prenaponi, naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije mreže, prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom, prisutnost signalnih napona.

Kod linearnih trošila valni oblik struje prati valni oblik napona tj. nema harmonijske distorzije, te nelinearna kod kojih valni oblik struje ne prati valni oblik napona zbog faznog kuta nastalog zbog karaktera trošila koje je priključeno na napon mreže. Velikim strojevima upravlja se automatizirano, sa što manjim ljudskim doprinosom jer su tako pogreške svedene na minimalnu razinu. Automatizirani pogoni imaju brojne prednosti u vidu ekonomičnosti, efikasnosti, jednostavnosti, ali i svojih mana od kojih je najveća ta što svi uređaji koji omogućuju automatizaciju unose harmonijski sadržaj u mrežu i mogu izazivati velike probleme kao što je topljenje izolacije na kablovima koje može dovesti do velikih šteta (kraću prekidi, dulji prekidi, požari...).

Kako bi izbjegli probleme nastale unosom harmonijskog sadržaja potrebno je planski osmisлити potrebnu količinu električne snage pogona, karakter trošila, vrstu frekvencijskih pretvarača, presjeke napojnih kablova, trafostanicu, itd... Za poništavanje harmonijskog sadržaja koriste se harmonijski filtri, a njih dijelimo na dvije vrste na pasivne i aktivne. Pasivni filtri se koriste u mreži gdje je unaprijed poznat harmonijski sadržaj kao npr. samo 5. harmonik, dok se aktivni koriste tamo gdje se pojavljuju različiti harmonici pa se u mrežu unosi inverzni valni oblik koji će rezultirati pravilnom sinusnom funkcijom.

Mjerni rezultati preuzeti iz pogona za obradu kakaovca u tvornici bombona i čokolade Kandit d.o.o. u Osijeku pomoću mjernog analizatora A-eberle PQ box 200 i programskog paketa WinPQMobil dali su uvid u harmonijski sadržaj. Na slikama 4.1. i 4.2 vidljiv je problem sa 27. harmonikom napona u fazi L1. Korištenjem norme HRN EN 50160 2012., te programskim paketom WinPQMobil utvrđeno je da za neparne harmonike reda većeg od 25. Ne postoje ograničenja, tako da možemo zaključiti da 27. harmonik sa iznosom 0.252% u fazi L1 zadovoljava normu EN 50160.

## 6.LITERATURA

- [1] Union of Electricity Industry - EURELECTRIC, *Application guide to the European Standard EN 50160 on "voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems"* July 1995.
- [2] HRN EN 50160:2012 „Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža“.
- [3] Klaić, Zvonimir; Sipl, Dalibor; Nikolovski, Srete. Economic Impact of Power Quality Disturbances // Proceedings of 22nd International Conference & Exhibition on Electricity Distribution, Stockholm, 2013.
- [4] Klaić, Zvonimir; Measurement and analysis of power quality in distribution networks according to Europe new norm EN 50160
- [5] Francisco C. De La Rosa, Harmonics and power systems, Distribution Control Systems, Inc.Hazelwood, Missouri, U.S.A.;2006
- [6] Baggini, Angelo, Handbook of power quality, University of Bergamo, Italy; 2008.godina
- [7] EE Publishers, Active and passive filtering techniques for harmonic mitigation, URL:<https://www.ee.co.za/article/active-passive-filtering-techniques-harmonic-mitigation.html>; 11.02.2019

## 7. ŽIVOTOPIS

Hrvoje Albert

Rođen je u Osijeku 15. lipnja 1993. U Osijeku, 2008. godine završava osnovnu školu „Tin Ujević“ s odličnim uspjehom, zatim se upisuje u „Elektrotehničku i prometnu školu Osijek“ smjer elektrotehničar kojega završava sa vrlo dobrim uspjehom 2012. godine.

2012. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.

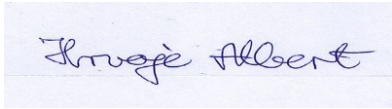
2016. godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer Održiva elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

Služi se engleskim jezikom, informatički je pismen te se služi programskim paketom Microsoft Office (Excell, Word, PowerPoint, Outlook). Slobodno vrijeme provodi u druženju s prijateljima, šetnji psa te gledanju filmova.

U Osijeku, 2019.

Hrvoje Albert

Potpis:



---

## 8.SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analizirani su mjerni rezultati preuzeti iz tvornice Kandit d.o.o. Teorijski je obrađena gradivo karaktera trošila, njihovi valni oblici, problemi nastali unosom harmonijskog sadržaja u elektroenergetski sustav, te su dana rješenja za probleme koje stvaraju harmonici.

**Ključne riječi:** Električna energija, kvaliteta električne energije, naponski propadi i prekidi, naponska kolebanja, harmonici i međuharmonici, prijelazni prenaponi, valovitost, tranzijentni prenaponi, naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije mreže, prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom, prisutnost signalnih napona, linearna trošila, nelinearna trošila, radno trošilo, prigušnica, kondenzatorska baterija, harmonijski sadržaj, harmonijska distorzija, pasivni i aktivni filteri,...itd.

## 9.ABSTRACT

In this graduate paper measurement results taken from Kandit d.o.o. factory were analyzed. Theoretically processed matter of the character's expense, their waveforms, the problems caused by the introduction of harmonic content into the power system, and are given solutions of solving problems that create harmonics.

**Key words:** Electrical energy, power quality, voltage failures and interruptions, voltage fluctuations, harmonics and intercoms, transient surges, waviness, transient overvoltages, voltage asymmetry, fundamental frequency change of the network, presence of DC voltage in alternating, presence of signal voltages, linear and non-linear wear, resistor, reactor, capacitor battery, harmonic content, harmonic distortion, passive and active filters, etc.